Актуальні питання нафтогазової галузі

УДК 622.276.7:622.245.43

ІСПИТ НА ВИЖИВАННЯ І ДЕЯКІ КОНКРЕТНІ РІШЕННЯ ОДНІЄЇ З ГЛОБАЛЬНИХ ПРОБЛЕМ

П.С. Мазурок, А.Б. Скочеляс, І.І. Радченко, М.О. Прілий, В.Я. Скиданчук

ТОВ «УкрСКС», 08140, Київська обл., Києво-Святошинський р-н, с. Білогородка, вул. Шевченка, 162-А; e-mail: newtehnology@sks-gk.com

Присвячено стану екосфери нашої Планети та наслідкам впливу на нього техногенної діяльності людства, а саме, нафтогазової галузі. Обґрунтовано можливість зменшення згубного впливу на екологію об'єктів нафтогазової промисловості шляхом якісного цементування нафтових та газових свердловин. ТОВ «УкрСКС» – піонер у створенні і широкому застосуванні матеріалів тампонажних розширних (РТМ) та цілого ряду його модифікацій, які сприяли значному покращанню контакту цементного каменю з обмежуючими поверхнями у свердловині. Наразі пропонується постійно проводити оцінку всіх тампонажних матеріалів (ТМ) для цементування. Пропонується досліджувати ТМ за методикою, не передбаченою існуючими стандартами, а саме, створеним компанією приладом ОГК-01. Він дає змогу у дуже простий спосіб виміряти тиск прориву води або газу по контакту цементного каменю з металевою поверхнею. Останнє дає виробничникам можливість правильного вибору ТМ серед широкого розмаїття пропозицій ринку.

Ключові слова: цементування свердловин, тампонажні матеріали (ТМ), контакт цементного каменю, матеріали тампонажні розширні (РТМ), тиск прориву, прилад ОГК-01, забруднення вуглеводнями екосфери.

Посвящается состоянию экосферы нашей Планеты, и результатам влияния на неё техногенной деятельности человечества, а именно нефтегазовой отрасли. Обосновывается возможность уменьшения пагубного влияния на экологию объектов нефтегазовой промышленности путем качественного цементирования нефтяных и газовых скважин. ООО «УкрСКС» – пионер в создании и широком использовании расширяющихся тампонажных материалов (РТМ) и целого ряда его модификаций, которые способствовали значительному улучшению контакта цементного камня с ограничивающими поверхностями в скважине. Предлагается постоянно проводить оценку всех тампонажных материалов (ТМ) для цементирования. Предлагается исследовать ТМ по методике, не предусмотренной существующими стандартами, а именно созданным компанией прибором ОГК-01. Он позволяет очень просто провести замер давления прорыва воды или газа по контакту цементного камня с металлической поверхностью. Это позволяет производственникам произвести правильный выбор ТМ среди широкого разнообразия рыночных предложений.

Ключевые слова: цементирование скважин, тампонажные материалы (ТМ), контакт цементного камня, расширяющиеся тампонажные материалы (РТМ), давление прорыва, прибор ОГК-01, загрязнение углеводородами экосферы.

It is devoted to the state of ecosphere of our Planet and the pernicious influence of the mankind's industrial activity, in particular, the oil and gas industry on it. A reduction of the pernicious influence by means of an adequate cementing of oil and gas wells is substantiated. UkrSKS LLC is a pioneer in the field of building and wide application of the expanding backfill materials (EBM) and a number of its modifications, which have contributed to a considerable improvement of the cement stone contact with the limiting surfaces in wells. Now, it is necessary to make a continuous evaluation of all the backfill materials (BM) offered for cementing. It is proposed to investigate the BM making use of the methods not stipulated by the existing standards; by means of OGK-01 (ОГК-01) instrument built by the company. That makes it possible to use a simple method of measuring the water or gas inrush pressure by the cement stone contact with the metal surface. The last gives the possibility to the industrialists of correct BM selection among a wide variety of the market supply.

Keywords: wells cementation, backfill materials (BM), cement stone contact, expanding backfill materials (EBM), inrush pressure, OGK-01 instrument, pollution the ecosphere by the carbons.

XXI століття з усією гостротою поставило перед нашою цивілізацією завдання – як в умовах глобальної технократії, найвищих досягнень у технічному розвитку цивілізації зберегти саму цивілізацію, а точніше середовище її існування. Так, останні дослідження вчених провідних університетів різних країн дають однозначні сумні висновки:

1. Основні ресурси Планети знаходяться на межі повного виснаження: їх не вистачить до кінця цього століття.

2. Навколишнє середовище (водні ресурси) знаходяться також на межі, за якою людство не зможе існувати, і вже сьогодні розплачується за прогрес важковиліковними захворюваннями.

Що ж робити? На сьогодні наша цивілізація не може, а точніше не готова відмовитися від використання «високих» технічних досягнень, які втілені в світову промисловість, гублять поверхню і надра Землі, водні і повітряні ресурси.

Надії XX-XXI ст. на використання в енергетиці керованого термоядерного синтезу та керування гравітаційним полем, що дало б можливість перевести людство на якісно новий рівень енергоспоживання, так і залишилися сподіваннями. Зменшити рівень енергоспоживання на виробництво одиниці будь якої продукції, хоча б у 10 разів, сьогодні також майже неможливо. При цьому ми знаходимося лише на початку шляху із задоволення наших енергетичних запитів за рахунок інших поновлюваних екологічно безпечних джерел енергії. У зв'язку з цим є один вихід зі складної ситуації – це мінімізувати, якщо не звести до нуля, всі шкідливі впливи на екосферу. Це – шкідливі викиди в атмосферу, у води річок, світового океану та в земні надра.

Мабуть не потребує доведення факт, що шкоду прісноводним ресурсам Планети завдає майже вся промисловість Планети. Тут своє місце займає паливно-енергетичний комплекс, що включає нашу нафтогазову галузь, але у забрудненні світового океану нафтогазова галузь є лідером. Щоб переконатися в цьому, досить переглянути статистику забруднень світового океану та його джерела за період хоча б з 1978 р. Тут перед нами постане жахлива картина збитку, нанесеного океану його флорі і фауні від аварій і катастроф, пов'язаних з експлуатацією нафтогазових родовищ на шельфі і транспортом нафти та продуктів перероблення нафти далеким від досконалості танкерним флотом, часто навіть не готовим до вирішення цих завдань, не свідомий всієї відповідальності, пов'язаної з цим. Чого лише варта аварія, що трапилась 20 квітня 2010 р. в Мексиканській затоці на буровій платформі «Deepwater Horizon», призначеній для експлуатації свердловини «Machundo» з гирлом, розташованим на глибині 1650 м, яку вважають однією з найбільших техногенних катастроф у світовій історії. Під час цієї аварії у води світового океану за найскромнішими оцінками потрапило 545 тис. т нафти. При цьому на глибинах близько 1000 м залишається значна неврахована кількість нафтових скупчень. Екосистема регіону постраждала на десятиріччя. При цьому лишились нез'ясованими наслідки катастрофи у найближчому майбутньому для інших континентів. Висновок про причини аварії – потужний прорив газу на гирлі, пов'язаний з незадовільною якістю кріплення!

Відомо, але, на жаль, не всі приділяють цьому багато уваги, що найважливішою ланкою в будівництві свердловини є надійне і довговічне кріплення. Останнє десятиріччя принесло багато нового і корисного у галузі кріплення нафтових і газових свердловин. Здавалося б, успіхи очевидні, що підтверджено численними конференціями, різного роду форумами, публікаціями в періодиці. Однак час економічної кризи загострив питання, які раніше не викликали занепокоєння. Сюди відносяться чинники, що впливають на зниження рівня видобутку вуглеводневої сировини і незадовільну екологічну безпеку. Щодо зниження ефективності експлуатації фонду діючих свердловин, тут існує багато причин. Ми хочемо торкнутися однієї з них – проблеми надійного та довготривалого кріплення свердловин. Саме з невирішеними проблемами в цій області часто бувають пов'язані заколонні перетікання, різке обводнення продукції, порушення норм охорони навколишнього середовища тощо. Саме це змусило апарат компанії УкрСКС негайно взятися за розробку нових підходів до цементування свердловин, пов'язаних з новою прогресивною методикою оцінки тампонажних матеріалів, що спираються на НДР і статистичний аналіз результатів робіт з цементування свердловин в різних нафтогазоносних районах України і Російської Федерації.

Одним з найважливіших понять у загальному обсязі термінології, що відноситься до галузі нафтової і газової промисловості, є глибоке і містке за змістом визначення терміну «будівництво нафтових і газових свердловин». Саме це поняття передбачає складний багатофакторний і поетапний технологічний процес. Тож якість пробуреної свердловини (або в зазначених вище термінах «збудованого об'єкта») вимагає якісного виконання всіх етапів будівництва з максимально можливим урахуванням супутніх цьому процесу чинників. Для кращого розуміння критеріїв якості свердловини як складної інженерної споруди – залізобетонної конструкції, слід, в першу чергу, враховувати призначення цього об'єкта. З метою точного визначення призначення свердловини можна використовувати таке коротке формулювання: закінчена будівництвом нафтова і газова свердловина є інструментом для вилучення вуглеводневої продукції з відповідних експлуатаційних зон, розташованих на різній глибині в гірничо-геологічних умовах різного ступеня складності. У цьому контексті під якістю свердловини як об'єкта, зазначеного вище призначення, слід розуміти її здатність сприймати знакозмінні механічні та гідродинамічні навантаження, що виникають в процесі тривалої експлуатації без виникнення незворотних негативних змін осно-

вних конструкційних характеристик, які можуть призвести до повної або часткової втрати експлуатаційних можливостей свердловини. У ряді випадків умови експлуатації свердловин можуть значною мірою ускладнитися хімічним впливом на елементи конструкції або пластових флюїдів або закачаних в свердловину технологічних рідин, проведенням гідророзриву пласта (ГРП). При цьому величезне значення має збереження гідроізолюючих властивостей цементного каменю в часі. Ця здатність кріплення залежить від властивостей цементного каменю, а саме: зміни структури і фізико-механічних характеристик у процесі розвитку гідратованої тампонажної системи в умовах свердловини (в першу чергу, зміна міцнісних характеристик), корозійної стійкості каменю при контактуванні з різними агресивними середовищами, кількості циклів навантажень різного роду, які здатний витримувати цементний камінь без критичного порушення структури. Принагідно зазначимо, що саме такими властивостями володіють тампонажні матеріали, що розширюються (РТМ). Піонерами у розробці, промисловому виробництві і впровадженні РТМ в процесах цементування на свердловинах родовищ України і Російської Федерації є ВАТ «УкрСКС » [1].

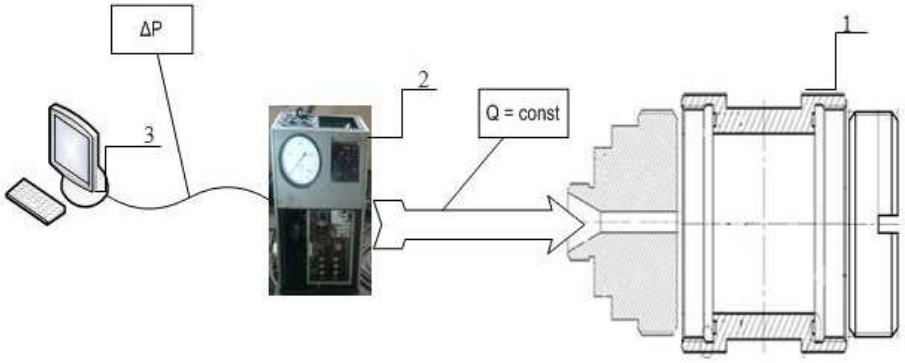
Серед параметрів, що визначають якісні характеристики готового до експлуатації об'єкта, найважливішими є параметри, що відносяться до оцінки результатів кріплення обсадних колон. У даний час існує ряд методик оцінки якості кріплення, які умовно можна поділити на прямі і непрямі. До умовно прямих методик оцінки якості кріплення можна віднести такі геофізичні методи досліджень: різні способи акустичної цементометрії (АКЦ), СГДТ, ОЦК, визначення ексцентриситету колони відносно осі свердловини. Умовно непрямі методи можна поділити на такі групи: аналіз експлуатаційних характеристик діючих свердловин, визначення наявності заколонної циркуляції геофізичними методами, лабораторні тестові та стендові випробування тампонажних систем. Кожна із зазначених методик має як переваги, так і недоліки, проте рамки цієї статті не дають можливості докладного розкриття зазначеної проблеми, тому відповідно до обраної тематики увагу буде акцентовано на питаннях, пов'язаних з оцінкою ефективності тампонажних систем, що визначаються лабораторними і стендовими методами. При цьому слід враховувати, що максимально об'єктивна оцінка результатів кріплення можлива тільки при використанні всього комплексу методів, тому в практичному застосуванні остаточний вибір, а також коригування методів цементування і властивостей тампонажних систем проводиться з урахуванням реальних результатів на свердловинах. Однак, важко заперечувати виняткову інформаційну важливість проведення лабораторних тестових аналізів і стендових випробувань як з використанням стандартних методик, відображених у нормативних документах, так і нестандартних досліджень з максимально точним моделюванням умов свердловини, особливо якщо врахувати ту обставину, що умовно прямі методи оцінки мають ряд істотних недоліків. Зупинимося детальніше на методах досліджень і стендових випробуваннях, а також тих властивостях тампонажних систем, які по-суті є найбільш важливими при вирішенні зазначених вище питань. У нормативних документах, які регламентують роботи з цементування свердловин, чітко фіксується ряд основних вимог до тампонажних матеріалів і тампонажних розчинів, а також детально описується методика проведення тестових лабораторних випробувань з використанням стандартних серійних приладів. Обсяг, таким чином, передбачених досліджень є мінімально необхідним для принципового проведення робіт на свердловинах, проте явно недостатнім для об'єктивної оцінки ефективності використання тих чи інших тампонажних систем в умовах реальних свердловин. Розглянемо трохи детальніше значущість основних властивостей тампонажних систем, які визначаються в ході стандартних випробовувань і, як нами пропонується, необхідність у визначенні параметрів, за допомогою методик та обладнання, використання яких в даний час не передбачено нормативними документами на застосування тампонажних матеріалів.

1. Параметри, які визначаються за допомогою стандартних приладів, а також з використанням нестандартних приладів і стендів. У разі використання стандартних приладів може бути застосована методика, не відображена в нормативних документах. Як приклад можна навести визначення зміни міцності зразків цементного каменю впродовж досить тривалого часу, сформованих в нестандартних термобаричних умовах, визначення щільності цементного тіста після кондиціонування в термобаричних умовах тощо. У разі застосування нестандартних приладів і стендів застосовується спеціально розроблена методика. Ці параметри також можна об'єднати за такою важливою ознакою: однозначність значення показника в системі «краще-гірше» при інших рівних показниках. Приклади: збільшення показника міцності з часом безперечно краще з точки зору збереження ізолювальних властивостей цементного каменю. Або підвищення параметра водовідділення є безперечно погано з точки зору забезпечення надійного контакту цементного кільця з колоною і з породою (те ж стосується показника зміни об'єму цементного каменю – зменшення в разі контракції – гірше, збільшення в разі розширення – краще.

Досвід нашої компанії свідчить, що марно сподіватись на успіх у процесі цементування свердловин без врахування таких параметрів та їх змін у часі:

- зміна міцності цементного каменю протягом тривалої витримки зразків у нейтральному середовищі (крива зміни міцності);

- корозійна стійкість цементного каменю при витримці зразків в агресивному середовищі;



1 – випробувальна комірка; 2 – насосний блок з давачем тиску; 3 – блок електронної реєстрації

Рисунок 1 – Схема установки ОГК-01 для оцінювання герметичності контактування цементного каменю з обмежуючою металевою поверхнею

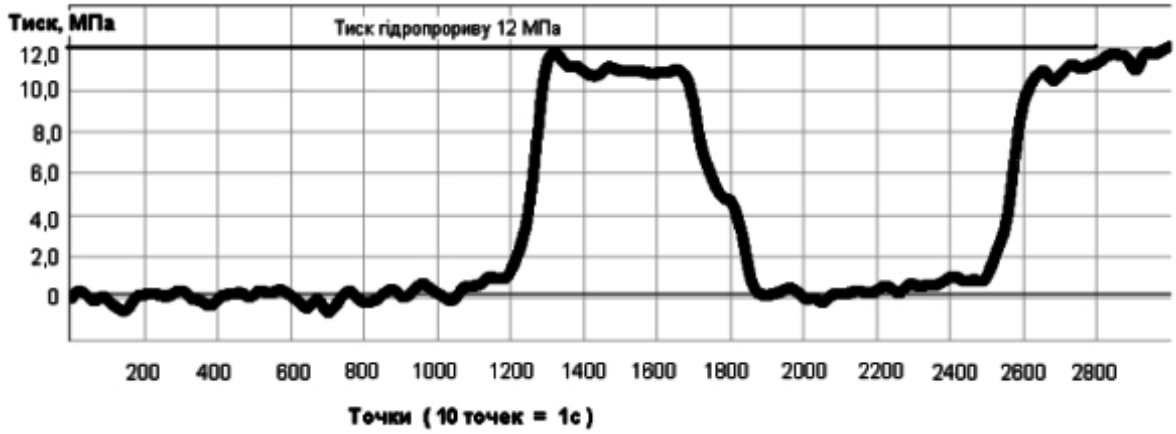


Рисунок 2 – Типова крива зміни тиску при подачі робочої рідини до випробувальної комірки, заповненої цементним каменем, що відображається на дисплеї блоку електронної реєстрації ОГК-01

- зміна об'єму цементного каменю у часі;
- проникність цементного каменю;
- зміна міцнісних характеристик цементного каменю в випадку аномально низьких температур;
- зміна міцнісних характеристик цементного каменю в випадку аномально високих температур;
- зміна міцнісних характеристик цементного каменю в разі температур, що динамічно або циклічно змінюються;
- тиск прориву води або газу по контакту цементного каменю з колоною і з породою у моделі, що імітує систему «обсадна колона – цементне кільце – порода».

Зазначимо, що таке дослідження вже сьогодні можна провести на розробленому та створеному ТОВ «УкрСКС» [2] приладі ОГК-01. Схематично прилад зображено на рис. 1; він складається з трьох основних блоків: 1- випробувальна комірка, 2 - насосний блок з давачем тиску, 3 - блок електронної реєстрації. Для проведення випробування у випробувальній комірці формують зразок цементного каменю за необхідних термобаричних умов. Після формування цементного каменю випробувальна комірка через штуцер приєднується до насосного блоку; одночасно сигнал, пропорційний тиску (від давача тиску) потрапляє до блоку ефектронної реєстрації приладу, для оцінки герметичності контакту цементного каменю з обмежуючою металевою поверхнею. Фактично прилад ОГК-01 є гідравлічною машиною для нагнітання до випробувальної комірки робочої рідини із заданою продуктивністю і фіксування характеру зміни тиску нагнітання у електронному вигляді. Робоча рідина нагнітається у випробувальну комірку до прориву її по контакту між зразком цементного каменю та металевою циліндричною стінкою (випробувальної комірки) до моменту стабілізації тиску, що виникає під час прориву робочої рідини через цей контакт. Характер зміни тиску фіксується у електронному вигляді та візуально спостерігається оператором на моніторі блоку електронної реєстрації (рис. 2). Результати обробки досліджень на приладі ОГК-01 відображені на рис. 3 графіком залежності тиску прориву води через контакт цементного каменю з обмежуючою металевою поверхнею від коефіцієнта розширення тампонажних матеріалів, що виробляються ТОВ "УкрСКС".

Слід враховувати, що застереження «за інших рівних» означає, що в реальних умовах важко досягти зміни величини одного параметра без зміни інших, проте в разі стабілізації ве-

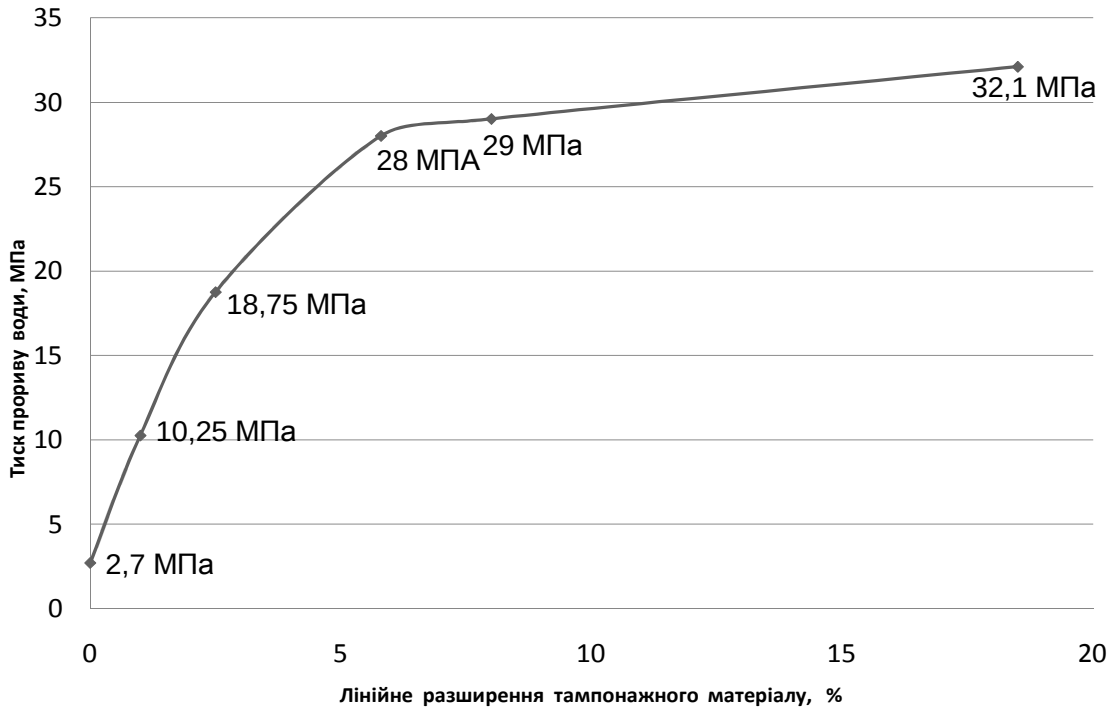


Рисунок 3 – Залежність тиску прориву води через контакт цементного каменю з обмежуючою металевою поверхнею від коефіцієнта розширення тампонажних матеріалів ТОВ "УкрСКС", що отримано з даних ОГК-01

личин решти параметрів, однозначність величини параметра в системі «краще-гірше» не викликає сумнівів. У випадку зміни величин всіх параметрів необхідно керуватися принципом їх оптимального співвідношення, з точки зору максимальної ефективності роботи цементного каменю в свердловині.

2. Параметри, які визначаться за допомогою методик та обладнання, використання яких наразі не передбачено нормативними документами на застосування тампонажних матеріалів. При цьому зазначені методики та обладнання можна поділити на дві категорії: такі, що використовуються в інших галузях, та такі, що були розроблені спеціально для випробовування тампонажних матеріалів. Ці параметри визначаються у різноманітних дослідженнях, які умовно поділимо на три групи:

a) визначення точного хімічного, мінералогічного та структурного складів сухого тампонажного матеріалу і цементного каменю, за допомогою методів і приладів, які наразі використовуються в інших галузях індустрії (насамперед в області виробництва цементів загального призначення), а також в наукових організаціях. До цих методів відносяться методи вивчення мікроструктури цементного каменю з використанням мікроскопів різного типу.

b) Вивчення фізико-механічних характеристик цементного каменю: модуль пружності, твердість, значення межі пружності, межі пластичності, межі міцності, абсолютний показник пластичності (визначені за значенням залишкових незворотних деформацій), показник крихкості, ударна міцність, або величина енергії руйнування.

c) Аналітичні дослідження, що дають нам теоретичну інформацію про характер процесів гідратації тампонажного матеріалу та розвиток цементного каменю на хімічному рівні, з урахуванням даних про склад і середовище формування. Вказані параметри не мають властивості однозначності в системі «краще-гірше» з двох причин: вказані параметри можуть служити або джерелом додаткової інформації в процесі прогнозування поведінки тампонажних систем як, наприклад, у випадку використання даних про хімічну структуру матеріалів і цементного каменю, а також даних про мікрофізичну структуру, або служити основою для більш складного обґрунтування оптимальності, шляхом механічного розрахунку поведінки системи «обсадна колона - цементне кільце - стінка свердловини», або іншої логічної дії за сукупністю характеристик, як у випадку обробки даних про фізико-механічні характеристики цементного каменю (в цьому випадку береться до увагу не тільки те, що має значення тільки сукупність характеристик, але і те що ці параметри не можуть бути незалежні один від одного). Таким чином, зазначена група параметрів повинна використовуватися далі в процедурі більш складного прогнозу поведінки тампонажної системи в умовах реальної свердловини.

Зазначимо важливість і нагальну необхідність такого підходу у визначенні властивостей тампонажних матеріалів і отриманого з них якісного цементного каменю, здатного до тривалого збереження своїх властивостей в складних умовах експлуатації свердловин. Це особливо важливо сьогодні, коли ринок тампонажних матеріалів переповнений матеріалами сум-

нівної якості, але за цінами, нижчими від цін на якісні тампонажні матеріали. Іноді навіть відомі компанії-оператори та сервісні компанії, намагаючись зменшити витрати на будівництво свердловин на 1%, беруть ці більш дешеві матеріали, забуваючи, що можуть отримати від цього збитки 100%....1000% або ще більші. При цьому остаточна оцінка якості неодмінно має спиратися на статистичний промисловий матеріал, який свідчить про результати застосування різних тампонажних систем. Процедура обробляння цієї інформації відноситься до розряду досить складних, про що ми детально розповімо наступного разу.

Література

1 Мазурок П. Особенности крепления скважин в условиях водоплавающих залежей нефти Калининградской области / П. Мазурок // Сборник трудов научно-практической конференции «GEOPETROL-2000»; [Prace nr 110, редкол.: М.Чехановська (отв. ред.)]. – Краков, 2000. – С. 561-564. – PL ISSN 0209 - 0724.

2 Спосіб та установка для визначення тиску гідропрориву цементного каменю / А.Б. Скочеляс, П.С.Мазурок, С.В.Зубков, Я.С.Гаврилов, Коробочкін, М.А.Плахетко І.І. – Заявл. 14.06.2011. – Опубл. 10.11.2011, Бюл. № 21, 2011. – (Патент України на винахід № 96561 МПК (2006.01) GO1N 3/12,GO1M 3/04,E21B 33/13,GO1N 33/38).

Стаття надійшла до редакційної колегії
23.01.13
Рекомендована до друку
професором ***Мойсишиним В.М.***
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)
професором ***Свідерським В.А.***
(НТУУ «КПІ», м. Київ)

УДК 553.981

ПРО ПЕРСПЕКТИВИ ВІДКРИТТЯ ПОКЛАДІВ СЛАНЦЕВОГО ГАЗУ НА ПРИКАРПАТТІ

[1]В.Р. Хомин, [2]А.Р. Клюка, [1]Л.С. Мончак

[1]ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 727121, e-mail: grn@nung.edu.ua

[2] Науково-дослідний і проектний інститут ПАТ "Укрнафта", 76019, м. Івано-Франківськ, Північний бульвар ім. Пушкіна, 2

Стаття присвячена аналізу перспектив газоносності нетрадиційних колекторів відкладів нижнього палеозою в зоні зчленування Східноєвропейської платформи з Передкарпатським прогином. Наведено їх літологічний опис, літолого-фаціальні особливості та виділено поля поширення літофацій відкладів силуру. Для більшості свердловин проведена переінтерпретація геолого-геофізичних матеріалів пробурених свердловинах з метою визначення літологічних особливостей відкладів силуру та істинної товщини досліджуваних порід. Відзначено, що максимальний вміст розсіяної органічної речовини приурочений до нижньосилурійських порід. Побудовано схематичні карти поверхні відкладів силуру і палеозою. Перспективи пошуків сланцевого газу пов'язуються з теригенними відкладами, в першу чергу силуру в зоні зчленування Східноєвропейської платформи з Передкарпатським прогином, причому про перспективи газоносності свідчать висока ступінь катагенетичних перетворень досліджуваних порід і газопрояви у процесі буріння свердловин.

Ключові слова: відклади силуру, поле літофацій, нетрадиційний колектор, схематична карта поверхні, перспективи газоносності.

Статья посвящена анализу перспектив газоносности нетрадиционных коллекторов отложений нижнего палеозоя в зоне сочленения Восточноевропейской платформы с Предкарпатским прогибом. Приведены их литологическое описание, литолого-фациальные особенности и выделены поля распространения литофаций отложений силура. Для большинства скважин проведена переинтерпретация геолого-геофизических материалов пробуренных скважинах с целью определения литологических особенностей отложений силура и истинной толщины исследуемых пород. Отмечено, что максимальное содержание рассеянного органического вещества приурочено к нижнесилурийским породам. Построены схематические карты поверхности отложений силура и палеозоя. Перспективы поисков сланцевого газа связываются с терригенными отложениями, в первую очередь силура в зоне сочленения Восточноевропейской платформы с Предкарпатским прогибом, причем о перспективах газоносности свидетельствуют высокая степень катагенетических преобразований исследуемых пород и газопроявления при бурении скважин.

Ключевые слова: отложения силура, поле литофаций, нетрадиционный коллектор, схематическая карта поверхности, перспективы газоносности.

This article analyzes the prospects of gas-bearing Lower Paleozoic sediments of the junction of the East European platform from the Carpathian basin, associated with non-traditional collectors. Their lithological description, lithofacies characteristics and lithofacies field distribution of Silurian sediments are done. Reinterpretations of geological and geophysical data are done for most well drilled wells to determine the Silurian sediments lithology and real thickness. It is noted that the maximal content of dispersed organic matter is confined to Lower Silurian rocks. Schematic maps of the sediments surfaces of Paleozoic and Silurian are built. Prospects of shale gas are associated with terrigenous reservoirs; primarily Silurian at the junction of the East European platform with the Carpathian basin, and the prospects of high gas content shows catagenetic transformations of studied rocks and gas indications during drilling

Keywords: Silurian sediments, lithofacies field, unconventional reservoir, schematic map of the surface, the prospects of gas bearing.

Світовий попит на газ зростає високими темпами, що сприяє стрімкому нарощуванню видобутку і збільшенню інвестицій з метою впровадження нових технологій освоєння родовищ. Тому у світі започатковано видобуток газу із нетрадиційних природних резервуарів, до групи яких відносяться газ щільних пісковиків, метан вугільних пластів та сланцевий газ. Останній утворюється у процесі катагенезу розсіяної органічної речовини (РОР) сланців, що складаються переважно із глинистих мінералів, гідрослюди, кварцу, кальциту та інших мінералів і мають шарувату текстуру. Для газоносних сланців обов'язковим є високий вміст РОР (>0,5%), що робить їх джерелом, а через низьку пористість та практично відсутність проникності – одночасно і акумулятором газу. Розсіяна органічна речовина цих сланців представлена в основному нерозчинною твердою речовиною – керогеном [1]. Останні дослідження запасів сланцевого газу, проведені у 2008–2011 рр. Управлінням енергетичної інформації Міністерства енергетики США та незалежною консалтинговою компанією Advanced Resources International Inc. для 48 басейнів у 32 країнах світу, показали, що його прогнозні ресурси досягають близько 1 200 трлн $м^3$ [2].

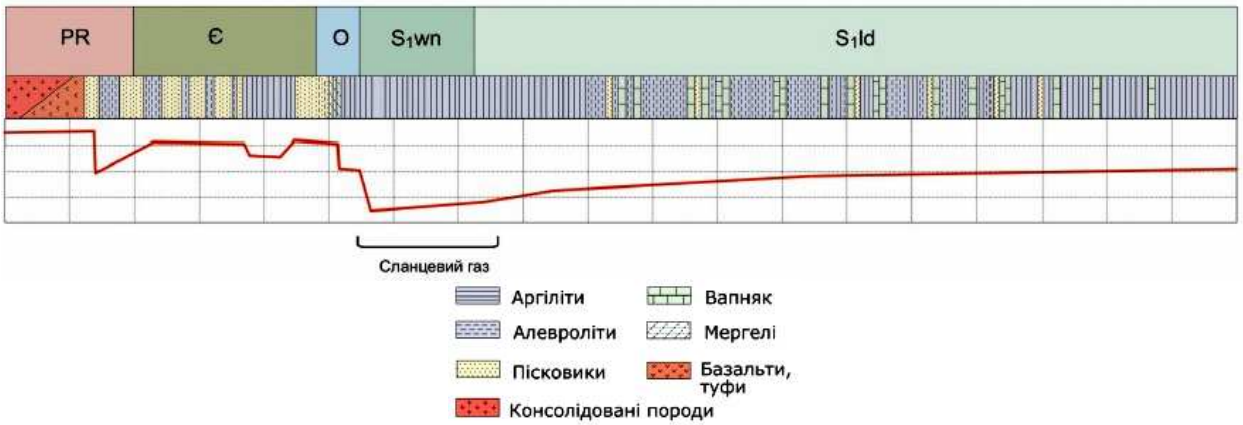


Рисунок 1 – Спрощений літолого-стратиграфічний розріз нижнього палеозою Люблінського регіону [4] (крива відображає зміну кількості Сорг)

Зважаючи на те, що дотепер основна увага була зосереджена на традиційних родовищах газу, інформація про скупчення сланцевого газу є досить обмеженою. В Україні цілеспрямовані роботи на пошуки та оцінку його запасів не проводились. Промислова розробка сланцевого газу здійснюється лише у Канаді та США. Першою країною у світі, якій вдалося подолати значні технологічні, екологічні та економічні проблеми реалізації проектів видобутку нетрадиційного газу, були США, які стали світовим лідером з газовидобутку і майже повністю задовольняють внутрішній попит власними ресурсами. Про масштабність сланцевої технології промовисто свідчить те, що протягом 2010 року в США було видобуто 138 млрд м^3 сланцевого газу – це приблизно чверть від загального обсягу газу, видобутого в країні [3].

Розробка покладів нетрадиційного газу до недавнього часу не викликала серйозної зацікавленості у світі, тому детальна оцінка запасів нетрадиційного газу за межами Північної Америки досі не проводилась. Вважається, що деякі країни світу, зокрема і Україна, мають значні перспективи видобутку нетрадиційного газу.

У Європі сланцевий газ поки що не видобувається, проте високими темпами проводяться роботи з визначення ареалів його поширення та оцінки ресурсів. Перспективними вважаються пошуки сланцевого газу у сусідній Польщі, де його запаси пов'язують зі збагаченими розсіяною органічною речовиною верхньоордовицькими та нижньосилурійськими сланцями ранньопалеозойського басейну на західному схилі Східноєвропейської платформи [4]. У центральних частинах Балтійського басейну та Підляської западини породи, які збагачені РОР, відносяться до відкладів лландоверу, а в східній частині Балтійського басейну та Люблінському регіоні найвищий вміст органічного вуглецю (Сорг) приурочений до порід венлоку. В останніх середній вміст Сорг, зазвичай, становить 1÷2,5 %, за винятком Підлясся, де він сягає 6,0 %. Щодо відкладів лландоверу, то в Балтійському басейні та Підляссі вміст органічного вуглецю в породах коливається від 0,5 до 1,3 %, а в східній частині Балтійського басейну та Люблінському регіоні сягає 1–1,7 % (рис. 1). Породи силуру Балтійського басейну та Люблінського регіону є термічно зрілими, перебуваючи на стадії катагенезу $МК_4$–$МК_5$ і $АК_1$. Аналізуючи результати досліджень [5], можна констатувати, що загальною тенденцією на картах-схемах катагенетичної зональності палеозойських відкладів Волино-Поділля є підвищення ступеня катагенезу вказаних відкладів на південний захід. Зона найвищого катагенезу $АК_1$ виділяється в районі, що безпосередньо прилягає до Передкарпатського прогину.

Люблінська ділянка пошуків сланцевого газу на території Польщі межує через кордон з Волино-Поділлям, де аналогічні відклади перебувають у подібних умовах, а наявність чорних сланців у вигляді як окремих прошарків, так і цілих пачок встановлено від верхнього протерозою до кайнозою [6]. Особливої уваги заслуговують чорносланцеві формації вендукембрію, силуру та девону у Львівському палеозойському та Передкарпатському прогинах. Зокрема, у межах північно-східної підзони Зовнішньої зони перспективними є чорні аргіліти лудловського ярусу силуру. Дані про вміст РОР у них відсутні, проте за відповідними аналогами кількість Сорг тут може становити до 3–5% [7].

Україна не залишає поза увагою світові тенденції пошуку нетрадиційного газу, проте численні публікації та дискусії щодо сланцевого газу в Україні відрізняються значною розбіжністю в оцінках його ресурсів, а інколи і популістськими припущеннями політиків та журналістів. Недостатня вивченість проблеми, а також відсутність методики пошуків, розвідки, видобутку та підрахунку ресурсів сланцевого газу вимагають детальнішого вивчення перспективних відкладів з метою встановлення їх поширення та оцінки їх потенціалу.

За даними В.І. Висоцького (1959), а також румунських геологів (Barbu, Vasilesku, 1967), у межах Волино-Поділля та частини Передкарпатського прогину розвинуті відклади ордовика-силуру, девону, карбону і пермі. Цей палеозойський комплекс помірно дислокований і є чохлом, що залягає на «зеленосланцевому»

складчастому фундаменті. Палеозойські утворення Мізійської плити розвинуті у субплатформових фаціях і різко відрізняються від одновікових складчастих утворень герцинід Добруджі [8]. У північно-східному напрямку від Лежайсько-Добрудзького верхньопротерозойського масиву в українській частині Передкарпаття на віддаль понад 350 км простягається широка смуга поширення палеозойських товщ. Найрозвинутішим тут є комплекс чорних невапнистих аргілітів з частими прошарками світлих, інколи зеленуватих, пісковиків кембрійського віку. Останній безпосередньо межує з Лежайським масивом і має ширину 18-24 км. В.М. Утробін (утроби и др., 1974) цей комплекс виділив у самостійну Коханівську зону. Північно-східніше простягається смуга (ширина 12-18 км) розвитку потужної товщі темно сірих часто вапняковистих аргілітів з окремими тонкими (5-10 см) прошарками вапняків, яка відома під назвою Рава-Руська зона [8]. У породах спостерігаються численні рештки фауни граптолітів, брахіоподи і остракод, які відносяться до силуру і нижньої частини девону.

Значна товщина та літо-фаціальна мінливість осадових товщ нижнього палеозою вказує на їхнє утворення в умовах інтенсивного занурення при активному надходженні переважно пелітового уламкового матеріалу. Значне переважання теригенних порід, їхнє ущільнення, збільшення товщини всіх стратиграфічних горизонтів вирізняють нижньопалеозойські відклади, які розвинуті в основі Передкарпатського прогину, від одновікових утворень схилу Українського щита та східного крила Львівського палеозойського прогину.

Чітке відокремлене поширення відкладів різного віку у вигляді широких дуже протяжних смуг, на думку [8], вказує на їх відмежування регіональними розломами або регіональними насувами. Насув порід кембрію на відклади силуру був установлений параметричними свердловинами Парище-14, Камінна-15 та Камінна-16.

У Рава-Руській зоні спостерігається поступовий перехід між відкладами силуру і нижнього девону, причому верхні горизонти розрізу майже не розвинуті. У той же час різка зміна морських умов осадконагромадження лагунними на прилеглій території у другій половині раннього девону за даними [8] вказує на тектонічну активність і загальне підняття території задовго до завершення ранньодевонського часу.

Палеозойські відклади у межах Передкарпатського прогину мають різноманітні кути падіння – від 20 до 50-60 °, хоча у переважній більшості – 10-15 °.

Ділянка розмиву, яка постачала уламки древніх порід у флішовий, а згодом і у моласовий басейни, можливо розташовувалась у сучасному плані південно-західніше краю насуву Карпат, а седиментаційний басейн, відповідно, знаходився ще західніше.

Силурійські відклади встановлені у свердловинах: 1-Загайпіль (1451 м), 1-Тлумач-Коломия (1445 м), 5-Красноільська (1447 м), 1-Чернівці (1294 м), 1-Ліщинська (1259 м), 3-Бучацька (610 м), 15-Лудинська (408 м), 15-Колинків (441 м), 1-Івано-Франківськ (840 м), 27-Богородчани-Парище (745 м), 2-Володимирівська (434 м), 1-Південо-Кадобнянська (52 м), а також на площі Коршів-Іспас та ін. Усі названі свердловини з максимальними товщинами знаходяться ближче до Східноєвропейської платформи, а на прилеглій до розлому території, що відділяє Зовнішню зону прогину від Внутрішньої, вони частково або повністю розмиті.

Відклади силуру виходять на денну поверхню на берегах Дністра, і, як видно з переліку, у свердловинах – в південно-східній частині Зовнішньої зони прогину. Серед них виділяють ландоверійський, венлоцький та лудловський яруси. Верхня частина розрізу складається переважно з сірих та темно-сірих, іноді зеленкуватих сланців з прошарками кристалічних вапняків. У цих породах трапляються залишки фауни трилобітів, граптолітів, брахіопод, остракод, луска риб тощо. У нижній частині розрізу переважають грудкуваті глини сірого, темно-сірого та зеленувато-сірого кольору. Глинисті доломіти, мергелі та глинисті сланці складають малу частку розрізу. Вапняки особливо багаті на викопні рештки брахіопод, коралів, трилобітів та строматопор. На площах Коршів-Іспас, Сторожинець у свердловинах переважно зустрічаються вапняки з прошарками аргілітів, алевролітів і пісковиків, а у свердловинах Красноільської площі переважають аргіліти.

Аналізуючи літературні джерела, фактичні дані результатів буріння та випробування свердловин, а також лабораторні описи зразків керну та шліфів силурійських відкладів щодо седиментаційних та палеогеографічних умов нагромадження силурійських відкладів доцільно вказати наступне. З початком ранньосилурійської епохи територія південно-західної окраїни Східноєвропейської платформи зазнала низхідних тектонічних рухів, що призвело до трансгресії моря з боку відкритої частини Палеотетісу. Подальші висхідні рухи, які відбувалися у лландоверійський час, призвели до повсюдного розмиву накопичених відкладів. Їх залишки збереглися тільки в окремих місцях на західному схилі Українського щита.

Не зважаючи на короткотривалі висхідні рухи, трансгресія моря повільно поширювалася із заходу на схід. У венлоцький час вона повністю охопила всю територію Волино-Поділля та досягла свого максимального розвитку. На думку [9], берегова лінія морського басейну проходила, ймовірно, на схід від міст Рівного, Хмельницького і Могилів-Подільського, тобто східніше сучасної межі поширення відкладів.

Силурійський басейн осадконагромадження охоплював, окрім досліджуваного регіону, значну частину території Польщі, Білорусі та Молдови (Боборинский и др., 1965; Люткевич и др., 1973; Aren і in., 1974; Tomczyk, 1976).

На Волино-Поділлі відклади венлоцького віку об'єднуються у китайгородський горизонт, товщина якого сягає 100 м. Область сучасного поширення вказаних відкладів утворювала у

той час єдиний седиментаційний басейн з чітко вираженими зануреними частинами (північно-західною та південно-східною), що розділені відносно припіднятою ділянкою. Вивчення розрізів китайгородського горизонту дослідникам [9] дозволило виділити три літологічних поля зі специфічними особливостями осадконагромадження. Перше, яке простягається в субмеридіанному напрямку вздовж межі сучасного поширення відкладів, розташоване у басейнах середньої течії Стиря та верхньої течії Горині і Збруча. Це поле складене переважно органогенно-детритовими і доломітовими вапняками, а також малопотужними прошарками аргілітів, які залягають у низах горизонту. Західніше першого поля широкою смугою простягається друге літологічне поле, що складене перешаруванням аргілітів і вапняків. Тут розповсюджені органогенні (коралові, брахіоподові) вапняки без домішок глинистого матеріалу. Третє поле розташоване у західних і південно-західних районах Волино-Поділля, маючи продовження на північ і північний-захід відповідно на території Білорусі та Польщі. Літологічний склад порід цього поля досить одноманітний. Його розріз повсюдно складений тонкошаруватими аргілітами, які у верхах горизонту поступово заміщуються глинистими вапняками і мергелями. У цих відкладах часто зустрічаються граптоліти, а також поодинокі мушлі брахіопод та остракод. Розвиток типово морської фауни вказує на нормальну солоність, достатні прогрітість та освітлення вод ранньосилурійського моря, глибини якого не перевищували мілку частину шельфу [9]. Ділянка суші, яка розташовувалась на сході території досліджень, була низовинною рівниною, що складена осадовими відкладами кембрію, венду і рифею, а також кристалічними породами архейсько-протерозойського віку. Знесення уламкового матеріалу з суші майже не відбувалося, про що свідчить мізерна кількість привнесених теригенних домішок у венлоцьких відкладах.

Початок пізньосилурійської епохи позначився тектонічною активністю території Волино-Поділля, яка визначалася значним прогинанням його західної частини. Для лудловського віку (верхній силур) характерне також підвищення вулканічної діяльності, про що свідчить наявність численних малопотужних прошарків туфогенних утворень у малиновецькому горизонті. Відклади лудловського ярусу нагромаджувалися в епіконтинентальному морському басейні та моноклінально занурюються у західному напрямку при поступовому зростанні товщини.

У седиментаційному басейні лудловського ярусу виділено [9] чотири літологічних поля. Перше розташоване у східній прибортовій частині вказаного басейну. Відклади нагромаджувалися тут у специфічних лагуноподібних умовах, що виникли у результаті значного обмілінння силурійського моря при незначному потеплінні клімату. Розріз цього поля складений переважно вапняками, серед яких зустрінуті малопотужні прошарки доломітів, збагачених глинистим матеріалом. Друге поле, що розташоване західніше першого та далі від берега, простягається у південно-східному напрямку від міста Володимира-Волинського до Хотина. У його межах нагромаджувалися переважно органогенно-детритові відклади. Це товща однорідних органогенних вапняків з окремими прошарками аргілітів. Нормальна солоність вод і достатній вміст кисню сприяли розвитку різноманітного комплексу фауни та утворенню в умовах теплого клімату коралово-строматопорових біогермів [9]. Останні приурочені до ділянок підвищеної товщини відкладів даного віку. Західніше другого поля та паралельно до нього простягається третє літологічне поле, яке на півночі і північному заході продовжується на територію Польщі і частково Білорусі (Лютkевич и др., 1973; Tomczyk, Jaworowski, 1976). На Волино-Поділлі воно розташоване в басейнах Прута, Дністра та середньої течії Бугу. У цій частині лудловського басейну нагромаджувалися карбонатно-глинисті відклади, які складені вапняками, мергелями і аргілітами. Органогенний матеріал тут майже не зустрічається, за винятком окремих включень дрібного детриту. Це свідчить про те, що незначне зниження температури в умовах дещо більших глибин басейну не сприяв розвитку морських організмів.

У межах четвертого літологічного поля, яке розташоване вздовж західного краю Східноєвропейської платформи, нагромаджувалася потужна товща переважно глинистих відкладів. Останнім притаманна наявність останків планктонної фауни – граптолітів. Особливості відкладів даного поля вказують на збільшення глибин, слабку рухомість вод, в основному придонних, ймовірно ненормальний газовий режим морського басейну [9]. Суша цього часу знаходилась східніше сучасної межі поширення відкладів та мала характер рівнинної низовини. Теригенний уламковий матеріал з неї майже не зносився.

Аналіз літофацій та товщин відкладів лудловського ярусу вказує на те, що у другій половині віку осадконагромадження у басейні відбувалося на регресивній стадії його розвитку.

Початок скальського віку вирізняється інтенсивним прогинанням західної частини силурійського седиментаційного басейну та незначним збільшенням площі нормальної морської ділянки. У другій половині віку переважали висхідні тектонічні рухи, які зумовили скорочення морського басейну. Східний беріг останнього змістився на захід порівняно з його розташуванням у попередній вік. Вивчення розрізів скальських відкладів дозволило [9] встановити збільшення їх товщини у західному напрямку та виділити у басейні осадконагромадження чотири літологічних поля. Перше простягається вздовж східного берега седиментаційного басейну. Тут нагромаджувалися переважно карбонатні відклади в умовах, які подібні до лагунних. Переважають вапняки з окремими прошарками доломітів. Ймовірно, змілінння морського басейну, яке відбувалося в кінці

віку, супроводжувалося деяким засолоненням його вод. Друге літологічне поле, яке розташоване на захід від першого, характеризується дещо відмінними умовами осадконагромадження. Його розріз складений переважно масивними вапняками з численними колоніями строматопороідей і коралів. Це свідчить про те, що солоність вод і газовий режим не відхилявся від норми. Значний розвиток викопних організмів вказує на теплий клімат того часу, який сприяв утворенню органогенних споруд типу біогермів. Тіла останніх розкриті багатьма свердловинами. Західніше та південно-західніше вищезазначеного поля виділяється третє поле, яке представлене глинистими вапняками, що переходять уверх по розрізу в мергелі тонкоплитчасті аргіліти. Породи вміщують дрібні мушлі брахіопод, рештки остракод, а також окремі утворення граптолітів, що свідчить про збільшення глибини цієї частини морського басейну. Четверте поле, що на заході межує з Передкарпатським прогином, охоплює найглибшу частину седиментаційного басейну скальського віку. Воно представлене глинистими породами, в яких з органічних решток найчастіше зустрічаються граптоліти. Склад порід та існування у них такої фауни вказує та те, що осадконагромадження відбувалося в умовах збільшення глибини моря, нижче лінії активного руху вод. У скальський час морський басейн зі сходу обмежувався низовинною сушею, з якої теригенний матеріал майже не зносився.

За результатами аналізу вищенаведеного матеріалу нами виконано спробу накласти поля поширень відкладів ярусів силурійської системи (рис. 2). Аналізуючи отриману карту поширення літологічних різновидів порід, привертає увагу, зважаючи на актуальність пошуків сланцевого газу у нетрадиційних колекторах, поле поширення теригенних порід силуру (рис. 2), яке розташоване на південному заході Східноєвропейської платформи і поширюється у напрямку Передкарпатського прогину. Необхідно наголосити на тому, що переважно попередні дослідники звертали увагу на карбонатні побудови силурійських відкладів Східноєвропейської платформи. І тільки останнім часом почалося окреме детальне вивчення і теригенних відкладів силуру [10, 11, 12 та ін.]. Тому, зважаючи на все вищенаведене, об'єктом досліджень є саме виділене нами поле поширення теригенних порід. Для подальшого дослідження структурних особливостей палеозойських відкладів з використанням фактичних даних пробурених свердловин, у тому числі і тих, що пробурені за останні роки, побудовано схематичну карту рельєфу розмитої поверхні палеозойських відкладів (рис. 3) та структурну карту покрівлі силурійських відкладів (рис. 4).

Як поверхня палеозойських порід (девон, силур), так і покрівля силурійських відкладів поступово занурюються у південно-західному напрямку. При цьому спостерігаються окремі відхилення від поступового плавного занурення товщі порід, що свідчить про існування локальних піднять або западин, а також поздовжніх тектонічних порушень. При наступному детальнішому дослідженні, найімовірніше, будуть виявлені перспективні з точки зору газоносності підняття або зони виклинювання окремих горизонтів.

Також необхідно звернути увагу на те, що аналізуючи результати досліджень [5, 7], можна констатувати, що загальною тенденцією на картах-схемах катагенетичної зональності палеозойських відкладів Волино-Поділля є підвищення ступеня катагенезу вказаних відкладів на південний захід. Зона найвищого катагенезу – $МК_4$ – $МК_5$ аж до $АК_1$ – виділяється в районі, що безпосередньо прилягає до Передкарпатського прогину. Зважаючи на те, що за генезисом сланцевий газ може бути біогенного (утворився на стадії діагенезу) та термобаричного (сформувався на стадії катагенезу під дією високих температур і тисків) походження, а у породах, що збагачені РОР і знаходяться на стадіях пізнього катагенезу $МК_4$ – $МК_5$ та метагенезу $АК_1$, фіксується швидке зростання до максимуму вмісту метану [1], то такий факт є ще одним вагомим доказом значної перспективності пошуків родовищ сланцевого газу саме на ділянці зчленування Східноєвропейської платформи та Передкарпатського прогину. Таке твердження корелюється також з висновками польських фахівців стосовно стадійності катагенетичних перетворень порід Люблінського регіону Польщі, який межує з територією України, про що згадувалося вище.

Необхідно зазначити, що згідно з даними польських та українських дослідників саме з теригенними породами силуру пов'язується підвищений вміст розсіяної органічної речовини, про що свідчить підвищена радіоактивність силурійських порід. Найвищі показники вмісту розсіяної органічної речовини спостерігаються у відкладах нижнього силуру, тому можна констатувати перспективність подальших детальних досліджень саме цього типу порід силурійської системи у межах зчленування Східноєвропейської платформи та Передкарпатського прогину. Крім цього, нашими дослідженнями попередньо встановлено, що занурення палеозойських порід у напрямку Складчастих Карпат має не абсолютно моноклінальний характер, а на окремих ділянках спостерігаються ускладнення геологічної будови території. Зважаючи на те, що щільні і не тріщинуваті породи є одночасно колектором і покришкою, а з тріщинуватих сланцюватих порід газ можливо мігрує вгору і накопичується під надійним екраном, тобто для формування скупчень газу необхідна пастка, то детальні локальні дослідження геологічної будови та умов залягання теригенних порід силурійської системи у межах зчленування Східноєвропейської платформи і Передкарпатського прогину є актуальними та перспективними.

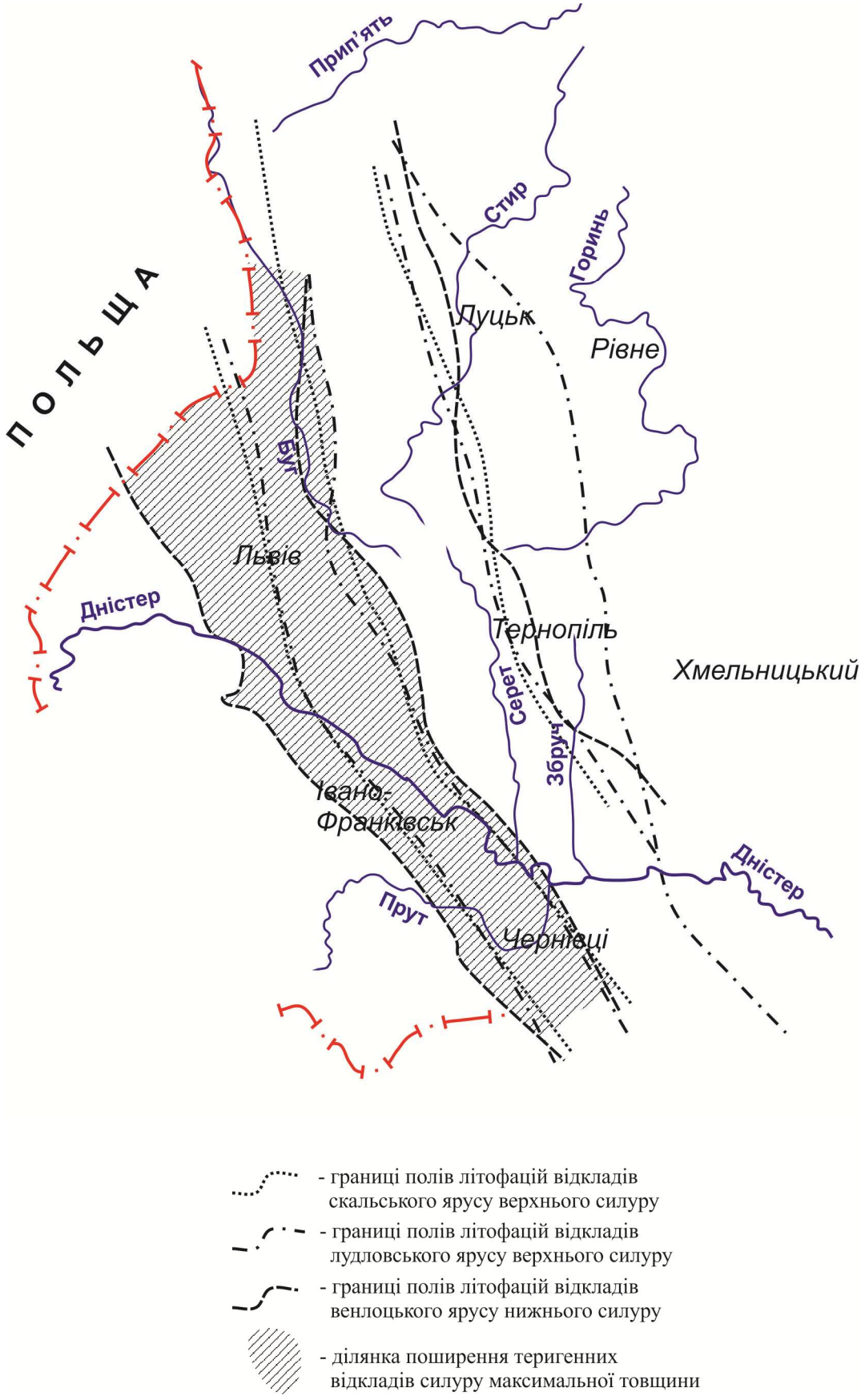


Рисунок 2 – Схема поширення літофацій силурійських відкладів у Західному регіоні України (склали: Хомин В.Р., Мончак Л.С., Клюка А.Р. з використанням матеріалів [9])

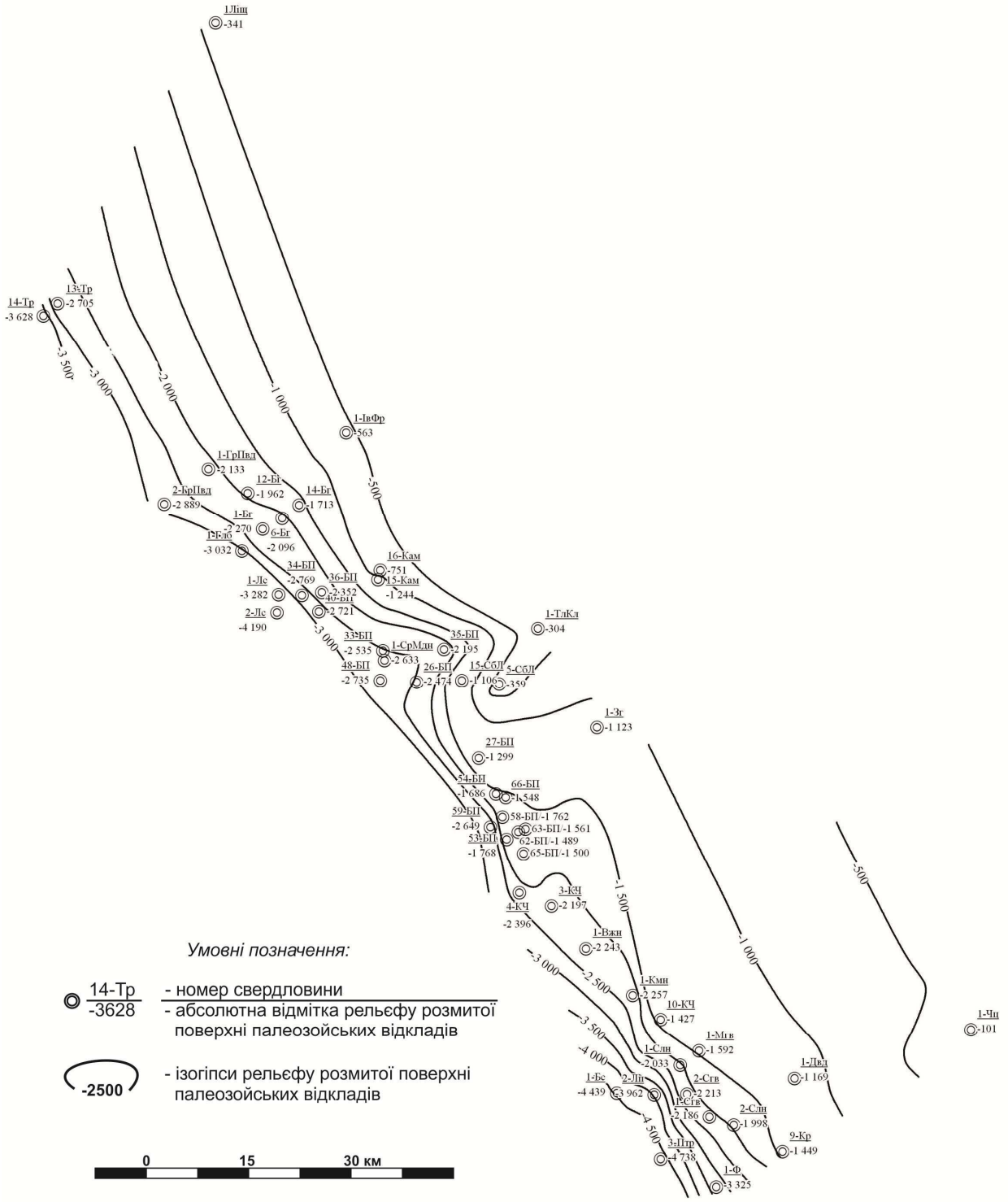


Рисунок 3 – Схематична карта рельєфу розмитої поверхні палеозойських відкладів. Масштаб 1:750000

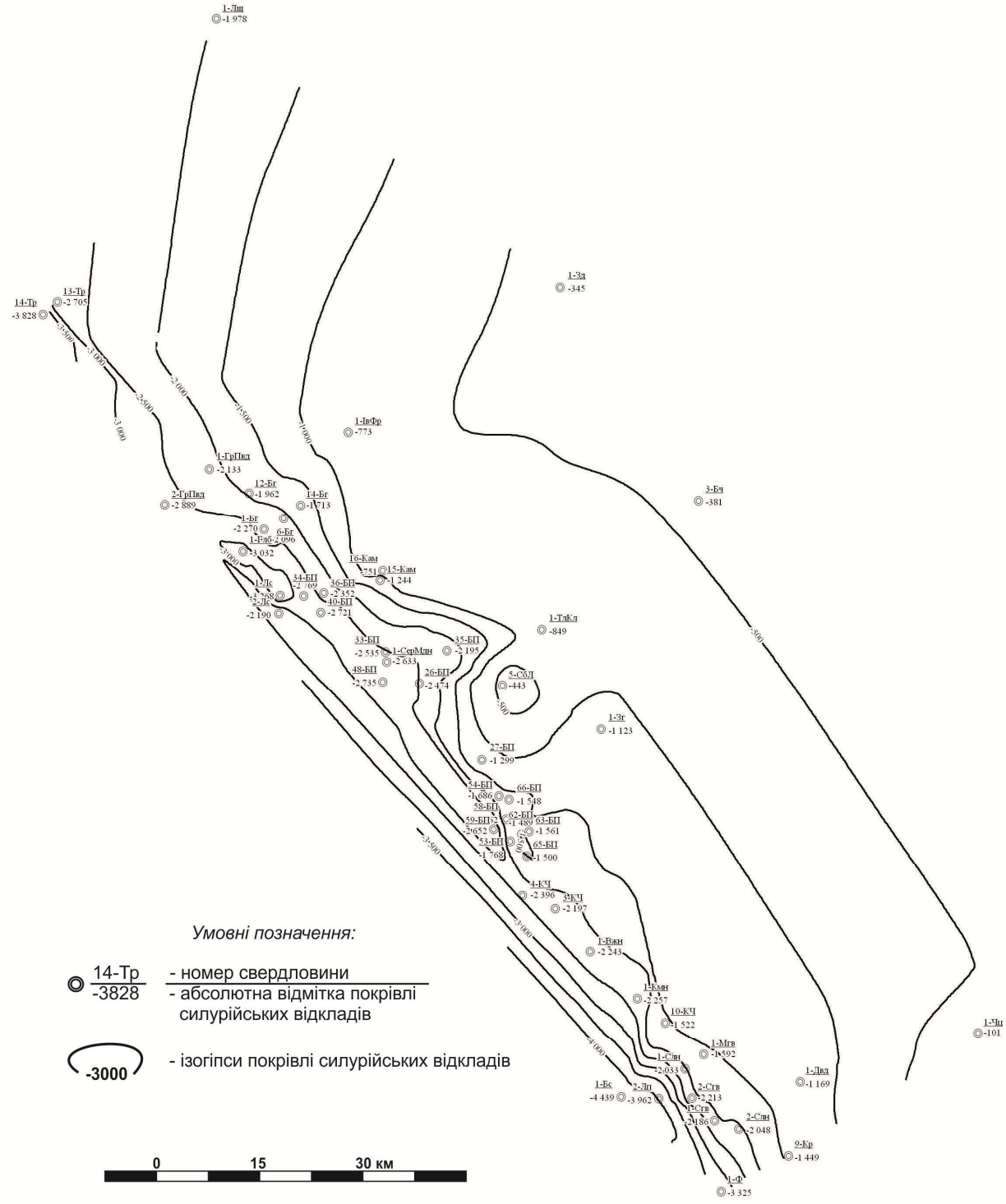


Рисунок 4 - Структурна карта покрівлі силурійських відкладів. Масштаб 1:750000

Література

1 Тиссо Б. Образование и распространение нефти / Б. Тиссо, Д. Вельте. – М.: Мир, 1981. – 500 с.

2 Альтернативи газозабезпечення України: скраплений природний газ (СПГ) та нетрадиційний газ (Аналітична доповідь Центру Разумкова) // Національна безпека і оборона. – 2011. – № 9. – С. 2–47.

3 Лук'янчук С. Велика сланцева революція. Споживання видобуток та запаси газу у світі. (http://texty.org.ua/pg/article/newsmaker/read/30608/).

4 Paweł Poprawa. Potencjał występowania złóż gazu ziemnego w lupkach dolnego paleozoiku w basenie bałtyckim i lubelsko-podlaskim // Przegląd Geologiczny. – 2010. – Vol. 58. – № 3. – S. 226-249.

5 Проблема нефтегазоносности глубокопогруженных палеозойских комплексов на территории УССР: Научный отчет / Шпак П.Ф., Бабадаглы В.А., Куриленко Н.А. и др. – Ин-т геол. Наук НАН УССР. – К., 1990. – Т.2. – 182 с.

6 Лукин А.Е. Сланцевый газ и перспективы его добычи в Украине. Статья 2. Черносланцевые комплексы Украины и перспективы их газоносности в Волыно-Подолии и Северо-Западном Причерноморье // Геологічний журнал. – 2010. – № 4. – С. 7-24.

7 Актуальні аспекти геології та геохімії сланцевого газу Волино-Поділля / І. Губич, Ю. Крупський, Я. Лазарук, Т. Сирота // Геолог України. – 2012. – №1-2. – С. 135-140.

8 Обоснование направления поисков нефти и газа в глубокозалегающих горизонтах Украинских Карпат / Відпов. ред. В.В. Глушко, С.С. Круглов. – К.: Наук. думка, 1977. – 176 с.

9 Геология и нефтегазоносность Волыно-Подольской плиты / Г.Н. Доленко, Б.П. Лизун, Ю.Н. Сеньковский и др. – Киев: Наук. думка, 1980. – 106 с.

10 Геолого-петрофізична характеристика басейнових дрібнозернистих порід силуру південно-західної окраїни Східно-Європейської платформи / І.М. Куровець, Д.М. Дригант, П.М. Чепіль, П.С. Чепусенко, А.І. Шира // Збірник наукових праць Інституту геологічних наук НАН України. – 2010. – Вип. 3. – С. 287-293.

11 Геохімічні дослідження та підрахунок ресурсів сланцевого газу в межах північно-західної частини Волино-Поділля / Я.Г. Лазарук, І.Б. Губич, Т.О. Сирота, В.В. Барчук, А.М. Дереневський, І.В. Александрова, О.І. Вислоцька // Горючі корисні копалини. – 2012. – №2. – С. 13-16.

12 Крупський Ю.З., Котик В.О. Геодинамічні умови та фаціальні особливості формування чорносланцевих відкладів протерозой-палеозою Волино-Поділля // Геодинаміка. – 2012. – №1 (12). – С. 86-92.

Стаття надійшла до редакційної колегії 14.02.13
Рекомендована до друку професором ***Федоришиним Д.Д.*** *(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)*
канд. геол.-мінерал. наук ***Штурмаком І.Т.*** *(НДПІ ПАТ «Укрнафта», м. Івано-Франківськ)*

УДК 552.578.3

ПЕРСПЕКТИВИ ПОШУКІВ ТА РОЗВІДКИ ГАЗУ З НЕТРАДИЦІЙНИХ КОЛЕКТОРІВ У ЗАХІДНОМУ БІТУМОНАФТОГАЗОНОСНОМУ РЕГІОНІ УКРАЇНИ

В.С. Боднарчук

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 40117,
e-mail: volodymyr_bodnarchuk@i.ua

Через зростання потреб населення у енергоносіях, людству доводиться звертатися до нетрадиційних джерел енергії. Проте, вітрова, сонячна та інші енергії не можуть достатньою мірою замінити традиційні вуглеводневі джерела. Саме тому в наш час гостро постало питання дослідження таких нових напрямків у нафтогазовій справі, як сланцевий газ та метан вугільних пластів. На думку вітчизняних та зарубіжних вчених, немає сумніву у перспективності видобування газу з нетрадиційних колекторів на території України. Адже присутність в межах нашої держави бітумінозних відкладів, сильно збагачених на органічну речовину, таких як менілітова світа олігоцену та спаська світа нижньої крейди, дає підстави робити певні прогнози і виділяти перспективні ділянки для пошуків, розвідки та видобутку газу з нетрадиційних колекторів. Особливо це стосується Західного бітумонафтогазоносного регіону, який на даний момент є найбільш перспективним щодо проведення науково-дослідних робіт даного типу. Проте, виникнення певних екологічних аспектів, пов'язаних з даним питанням, змушує замислитись над вдосконаленням схеми вилучення вуглеводнів з сланцевих порід, які раніше вважались породами-покришками та запропонувати нові напрямки, які б мінімізували вплив процесу видобування газу на навколишнє середовище.

Ключові слова: бітуми, сланцюваті породи, газ з нетрадиційних колекторів, спаська світа.

В связи с ростом потребностей населения в энергоносителях, человечеству приходится обращатся к нетрадиционным источникам энергии. Однако, ветряная, солнечная и другие энергии не могут в достаточной мере заменить традиционные углеводородные источники. Именно по этому, в наше время остро стал вопрос исследования новых направлений в нефтегазовом деле таких как, сланцевый газ и метан угольных пластов. По мнению отечественных и зарубежных ученых, нет сомнения в перспективности добычи газа из нетрадиционных коллекторов на территории Украины. Так как присутствие в пределах нашей страны битуминозных отложений, сильно обогащенных на органическое вещество, таких как менилитова свита олигоцена и спаская свита нижнего мела, дает повод делать некоторые прогнозы и выделять перспективные территории для поисков, разведки и добычи газа из нетрадиционных коллекторов. Особенно это касается Западного битумонефтегазоносного региона, который на данный момент является наиболее перспективный в плане проведения научно-исследовательских робот данного типа. Однако, появление некоторых экологических аспектов, связанных с данным вопросом, заставляет задуматься над усовершенствованием схемы извлечения углеводородов из сланцевых пород, которые считались породами-покрышками и возможно предложить новые направления, которые бы минимизировали влияние процесса добычи газа на окружающую среду.

Ключевые слова: битумы, сланцеватые породы, газ из нетрадиционных коллекторов, спаская свита.

Due to the growing needs for new power energy sources people have to turn to unconventional sources. However, the wind and the sun energies can not become sufficient substitutes for traditional hydrocarbons. That brings to the fore the challenge of new search for oil and gas, namely for shale gas and coal bed methane. As native and foreign scientists state, there is no doubt about the perspective of gas production from unconventional reservoirs on the territory of Ukraine. The availability of bituminous deposits, highly enriched with organic substances of such stratigraphic unites as minilite suite of Oligocene and spas suite of ***Lower Cretaceous*** *period allows researcherd to make certain predictions and distinguish perspective sites for searching, prospecting and producing unconventional gas. This concerns particularly the Western bitumen-oil-and-gas bearing region, which is considered the most perspective in the context outlined. However, certain ecological issues related to this problem motivate scientists to improve a hydrocarbons extraction scheme from shale rocks, which were earlier considered as overlay rocks and to offer new directions which would minimize the impact of gas production from unconventional reservoirs on environment in the near future.*

Key words: bitumen, shale rocks, gas from unconventional reservoir-rocks, spas suite.

Вступ. В наш час, враховуючи гостру потребу людства у вуглеводневих енергоносіях, все гостріше постає проблема пошуку, розвідки та розробки нових покладів вуглеводнів (ВВ). У зв'язку з актуальністю даного питання науковці розпочали розгляд раніше неперспективних джерел енергоносіїв. Саме тому почались активні пошуки на великих та надвеликих глибинах осадової оболонки земної кори, на континентах та в шельфових зонах морів і океанів, видобуток метану вугільних пластів, а також видобування природного газу з бітумінозних порід (зокрема з сланців та сланцюватих аргілітів). Раніше породи даного типу вважались суто породами-покришками, пізніше – материнськими породами, здатними генерувати та вміщувати в собі ВВ (нетрадиційні колектори). Слід зауважити, що гірські породи даного типу не привертали уваги науковців також через низьку їх проникність (0,1 – 10 μD).

Під терміном нетрадиційний колектор розуміють будь-які непроникні породи, що довший час вважались покришками в пастках для нафти і газу, але останнім часом вони проявляють себе, як породи, які можуть вміщувати та генерувати флюїди, у тому числі і газ при певному на них впливу.

Отже, постала необхідність у проведенні науково-дослідних робіт з метою уточнення нафтогазогеологічного районування. Особливо гостро це питання постало в нашій країні, оскільки більшість графічного матеріалу вже застаріла. Враховуючи швидкість накопичення нової геологічної інформації, виникла необхідність у проведенні нафтогазогеологічного районування, беручи до уваги бітумінозність літолого-стратиграфічного розрізу в окремих областях України.

Відмінність технологій видобування та експлуатації свердловин у нетрадиційних та традиційних колекторах в межах газових та нафтових покладів, відкритих за наявності бітумінозних порід, викликала необхідність розділення під час нафтогазогеологічного районування таких термінів, як "нафтогазоносні" та "бітумонафтогазоносні" території. Саме тому території, де наявні відклади з високим вмістом бітумів, вважаються бітумонафтогазоносними регіонами, областями тощо. На сьогодні розроблена принципово нова схема бітумонафтогазогеологічного районування [1].

На території нашої держави виділяють три бітумонафтогазоносні регіони (БНГР):

- Західноукраїнський БНГР;
- Східноукраїнський БНГР;
- Південноукраїнський БНГР.

У межах Західноукраїнського БНГР виділяють три бітумонафтогазоносні області (БНГО):

- БНГО Волино-Подільської плити і Зовнішньої зони Передкарпатського прогину;
- БНГО Внутрішньої зони Передкарпатського прогину та Складчастих Карпат;
- Закарпатська БНГО.

Саме Західноукраїнський БНГР розглядається як найбільш перспективний в плані видобутку природного газу з нетрадиційних колекторів, сильно збагачених органічною речовиною (ОР) сапропелево-гумусового рядів.

Проаналізувавши сучасні закордонні та вітчизняні дослідження та публікації слід зауважити, що найбільш збагаченими бітумами відкладами в західних областях України на сьогодні слід вважати сланці і сланцюваті аргіліти та алевроліти менілітової світи олігоцену Внутрішньої зони Передкарпатського прогину та Скибової зони Карпат (Західноукраїнський БНГР). Ці породи - від коричневого до чорного кольору виходять на денну поверхню та залягають на різних глибинах у різних насунутих один на одний тектонічних поверхах Внутрішньої зони та в розрізах різних скиб (лусок) Скибової зони Карпат. Чорні сланці і аргіліти містять органічну речовину (ОР) сапропелевого ряду іноді до 50 % за об'ємом (наприклад, у відслоненнях р. Рибниця в Покутських Карпатах) [2]. В чорносланцевій товщі менілітової світи зустрічаються шари і прошарки темного кольору алевролітів, сірих кварцових пісковиків та світло-сірих смугастих вапняків. В сланцюватих чорних аргілітах повсюди можна зустріти велику кількість відбитків лусок, кісток та інших залишків морської фауни. Середнє значення ОР в менілітових сланцях, за результатами досліджень на різних площах, в тому числі і в керні свердловин, оцінюється як 30%, а мінеральної речовини – близько 70% від маси породи. В мінеральному складі менілітових сланців головну роль відіграє кремнезем в аморфній напівкристалічній формі опалу і халцедону. Крім кремнезему в менілітових сланцях, як було вказано вище, міститься велика кількість органіки, відносно мало відновленої і з великою кількістю кисню та сірки. В менілітах також часто зустрічається близько 10-15% Al_2O_3, Fe_2O_3 - близько 5%, незначний відсоток лугів, а також TiO_2, CaO, MgO, P_2O_5 та ряд інших сполук.

Перші дані про чорносланцеві породи, як про сировину для одержання вуглеводневих енергоносіїв в Західних областях України були викладені ще у 1941 році в роботі під редакцією професора Н.А. Биховера [3], який вказує, що найбільш серйозні спеціальні дослідження бітумінозних порід у цілому ряді районів Західної України проводилися, ще у 1928 році А. Ружинським та Я. Зелінським. З їхніх досліджень були зроблені висновки, що гігроскопічна вода утримується в породах від 1,23 до 4,62%, в залежності від кількості у породі колоїдальної частини глин, а також від вмісту кристалізаційної води окремих мінералів, наприклад гіпсу, у складі горючої твердої і леткої речовини врахована смола, світильний газ і його комплектуючі компоненти. Встановлено, що у взірцях досліджуваних порід вміст горючої речовини (в тому числі і газів) в середньому дорівнює 23,09%. У деяких випадках горючої речовини значно більше. Тому, до найбільш перспективних для одержання вуглеводневої сировини з сланців олігоцену були віднесені сланці з вмістом горючої речовини більше 20%, а золи порядку 80%.

В 1961 році В.Б. Порфірєвим, І.В. Грінбергом та іншими детально описуються можливості видобування бітумних сланців кар'єрним методом та транспортування їх на відповідні переробні підприємства для подальшого їх використання в багатьох галузях промисловості. Потужність цієї серії дозволяє в повній мірі використовувати потенціал цього нетрадиційного джерела енергії та промислових матеріалів, адже їх товщина коливається в досить значних межах - від декількох десятків до більше, ніж 1500 м. Наприклад, в Береговій та Орівській скибах менілітова серія має найбільшу потужність, яка в багатьох місцях перевищує 1,5 км. Тут маємо також найбільші запаси менілітових сланців. В той час як на одному з найперспективніших родовищ США Марцеллус, потужність девонських сланців сягає до 270 м. До того ж менілітова серія відзначається меншою кількістю шарів пісковиків.

Менілітова світа вважається також перспективною в плані пошуків, розвідки та розробки нетрадиційних родовищ ВВ в зв'язку з тим, що на основі вивчення розрізів менілітових відкладів у природних відслоненнях і за даними глибоких свердловин давно встановлено, що найбільш розповсюдженими породами в цій товщі є аргіліти, вміст яких досягає 80% від загального розрізу (глибина даного стратиграфічного підрозділу досягає 1700 м і більше). Забарвлення сланцюватих аргілітів, як показали дослідження, обумовлено присутністю тонкодисперсних органічних (бітумів і гумінів) та неорганічних (пірит) пігментів. Основними мінеральними компонентами в складі аргілітів є опал, органічна речовина (бура і червоно-бура в прохідному світлі), пірит, політоморфний карбонат, волокнисті та у формі лусок мінерали глин, залишки кальцитових (фораменіфери) і кремнистих (опікули губок і округлі з зазубреними краями сфери) організмів, і невизначені опалові утворення. Бурувата органічна речовина просякає основну масу аргілітів як правило нерівномірно. Іноді відмічається чергуванння мікрошарів, різко збагачених органічним матеріалом, а інколи ця речовина створює мікропрошарки, витягнуті лінзочки і стебливидні зігнуті утворення, орієнтовані в напрямі мікрошаруватості породи [4].

Серед уламків органічних скелетів зустрічаються кальцитові раковини фораменіфер, халцедонові і опалові спікули губок і сфери радіолярій, порожнини яких і навіть скелети повністю чи частково заміщені карбонатом (кальцитом і доломітом), присутні одно-, дво- і трипроменисті спікули.

В 1953-1956 роках В.Б. Порфірьєвим та іншими були проведені дослідження, які вказують, що цінною часткою продуктів перегонки менілітових сланців є сланцевий горючий газ, який утворюється в об'ємі 30 л на 1 кг сухого сланцю, а також бензин і кероген відповідно 10 т і 15 т на 1000 т переробленої породи [5].

У 1990-1991 роках за угодою між Івано-Франківським інститутом нафти і газу (ІФІНГ) і Французьким інститутом нафти (IFP) французькою експериментальною пересувною геохімічною станцією, при дослідженні флішових відкладів Карпат були одержані результати, які підтверджують наявність вмісту органічної речовини в породах менілітової світи до 30% [6].

До даного часу сланцюваті породи менілітової світи зазвичай вважали породами покришками для піщаних пластів з покладами нафти і газоконденсату. Проте, на сьогоднішній день потрібно вияснити чи не можуть вони відігравати роль нетрадиційних колекторів при видобуванні нафти та газоконденсату.

Саме тому проблематика даного питання є настільки важливою. Основною метою статті є виділення перспективних відкладів для подальших пошуків та розвідки сланцевого газу.

До першочергових ділянок, стосовно видобутку природного газу та інших вуглеводневих енергоносіїв із бітумінозних товщ в Західноукраїнському бітумнонафтогазоносному регіоні слід віднести чорносланцеві породи менілітової світи олігоцену Внутрішньої зони Передкарпатського прогину і Скибової зони Карпат. Бажано провести експериментальне буріння свердловин в інтервалах залягання чорносланцевих порід менілітової світи на невеликих глибинах різних тектонічних поверхів на південно-східних крилах антиклінальних структур, де вони залягають полого. Для цього можна рекомендувати Соколовецьку та Блажівську площі Внутрішньої зони Передкарпатського прогину Західноукраїнського БНГР [1, 7].

Основний матеріал

Важливим питанням в проблемі пошуків газу в сланцевих і бітумінозних породах є розробляння діагностування цих порід геофізичними дослідженнями свердловин. Було проведено порівняння між каротажними діаграмами деяких чорносланцевих товщ США, де видобувається сланцевий газ та каротажними діаграмами свердловин, які розкрили бітумінозні породи чорного кольору менілітової світи олігоцену і сланцюватих сірих і сіро-зелених порід бистрицької світи еоцену. Чорносланцеві породи США і товщі порід менілітової світи родовищ Внутрішньої зони Передкарпатського прогину мають майже ідентичні промислово-геофізичні характеристики. Їх електричний умовний опір низький (порядку 5-7 Ом·м). На кривих ПС вони подібні до непроникних щільних аргілітів, тобто без аномалій, що є характерним для даного типу порід; на кривих ГК ці породи характеризуються підвищеною природною радіоактивністю, а на кривих НГК – заниженими значеннями. На кавернограмі чорносланцеві породи вирізняються слабким збільшенням діаметра.

Дуже цікаво, що сланцеві аргіліти бистрицької світи, які не є збагаченими ОР, мають інші геофізичні параметри, ніж менілітові сланці та сланці в США. Адже навіть при макроскопічних дослідженнях порід бистрицької світи можна з впевнено стверджувати про те, що вони не відносяться до порід, збагачених на ОР. Уявний електричний опір в менілітових відкладах іноді сягає 12-14 Ом·м і більше, в залежності від вмісту ОР, так як вона з продуктами її перетворення є діелектриками. Проте, у бистрицьких породах, в яких практично відсутня ОР, характеризуються нижчим умовним опором - 8 Ом·м.

Було проведено також порівняння каротажних діаграм свердловин різних площ в межах Західноукраїнського БНГР (Верхня Луква, Рудавець, Чечва, Рожнятів та Марково). Розглянувши кілька свердловин по кожній із вище вказаних площ, була помічена закономірність підвищення показників ПС, а також умовного опору у відкладах менілітової світи, у порівнянні з іншими товщами, що були присутні у розрізах свердловин (рис. 1, 2, 3). В основному увагу привернула різниця між показниками відкладів бистрицької та менілітової світ. Враховуючи те, що відклади цих двох стратиграфічних підрозділів практично не різняться за мінеральним складом, можна зробити висновок, що на показники геофізичних дослі-

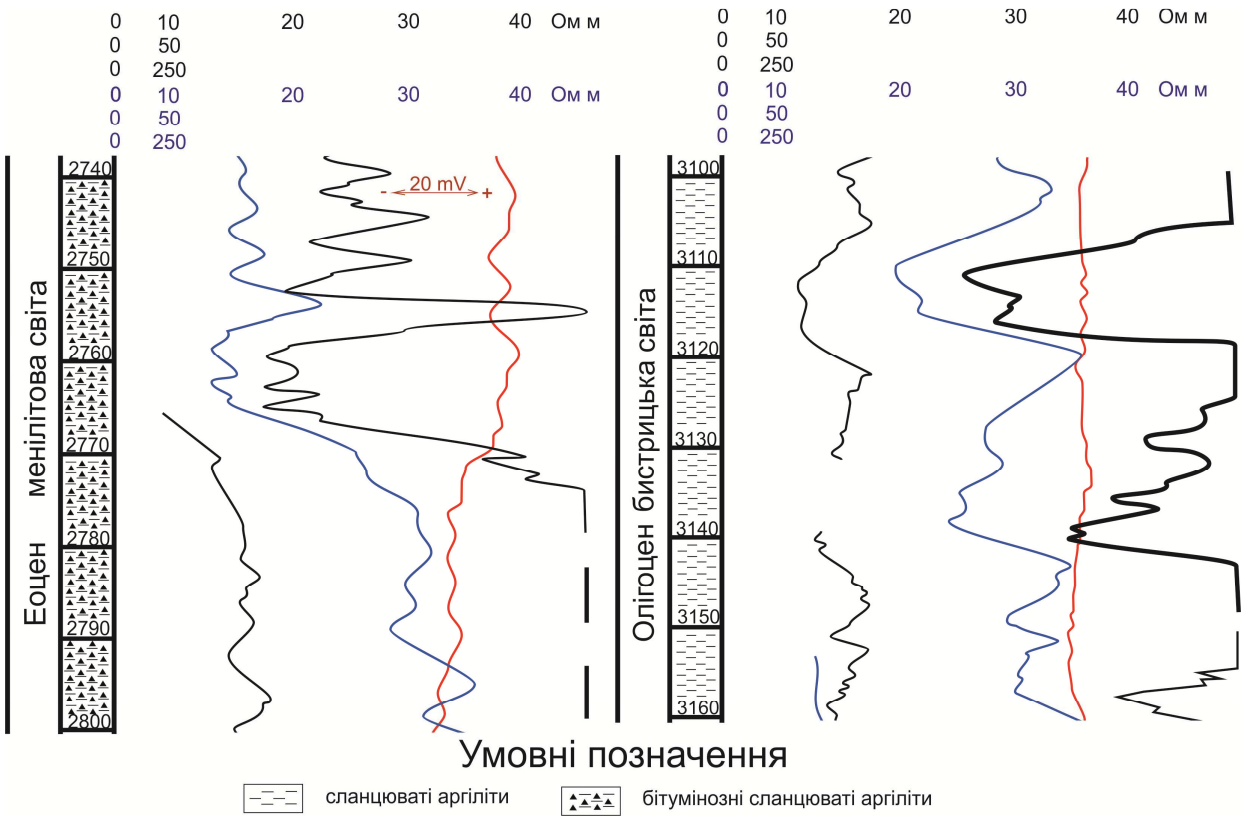


Рисунок 1 – Кореляційна схема відкладів менілітової та бистрицької світ свердловини 1-Чечва

джень свердловин значний вплив мають збагачені ОР бітумінозні товщі [1, 8].

Висновок 1. Наведені дані, на наш погляд, можна використовувати як допоміжний показник під час проведення геофізичних досліджень, з метою виділення в розрізах свердловин перспективних на природній газ відкладів не тільки в товщі менілітової світи олігоцену, а й, наприклад, у породах спаської світи нижньої крейди або навіть у майкопських відкладах Південноукраїнського БНГР.

У зв'язку із загостренням дискусії щодо можливості пошуків, розвідки та видобування сланцевого газу в Карпатському регіоні були проведені польові дослідження порід спаської світи у відслоненнях русла р. Дністер та його приток, на площі сіл Тершів, Бусовисько та Верхній Лужок в 15 км на південний захід від м. Старий Самбір [1] (рис. 4).

В геологічному відношенні дана площа знаходиться в межах Берегової скиби Скибової зони Карпат в крайовій північно-східній смузі насуву вказаної скиби на Бориславо-Покутську підзону Внутрішньої зони Передкарпатського прогину. Про це свідчить часте залягання порід – під кутами 80-90° і дуже сильна їх перем'ятість. Цікаво, що у відслоненнях вздовж р. Дністер вертикально залягаючі консолідовані породи спаської світи (як образно кажуть геологи, такі, що «стоять на голові»), можуть бути використані як стежки для геологічних маршрутів. Однак, на окремих ділянках можна спостерігати виположування пластів порід (рис. 5), де вони залягають під малими кутами падіння, а у деяких випадках – майже горизонтально.

Відклади спаської світи є шаруватою товщею чорних сланцюватих аргілітів та сланців, темного кольору алевролітів, сірих і темно-сірих пісковиків, подекуди зустрічаються шари світло-сірих смугастих вапняків. Трапляються чорні аргіліти, метаморфічне перетворення яких дозволяє називати їх сланцями, та темні слабо-вапняковисті алевроліти, а також шари і прошарки цих порід, які не реагують з HCl. Всюди у свіжому зламі чорносланцевих аргілітів і темних алевролітів відчувається сильний запах бітуму. Крім того, чорні аргіліти жирні на дотик. Пісковики, які залягають в товщі спаської світи, сірі, в основному кварцеві, хоча за допомогою лупи можна побачити присутність глауконіту, від дрібно- до середньозернистих, слабо- і середньовапняковистих. Їх товщина іноді перевищує 60 см. Вапняки сірі, дуже часто смугасті, сильно метаморфізовані, товщиною до 60 см.

На наше замовлення в УкрНДГРІ м. Львів після відбору взірців Н. Трофимович в лабораторних умовах були проведені мікропалеонтологічні дослідження, які довели, що всі відібрані породи можна віднести до спаської світи нижньої крейди. У взірцях порід була визначена наступна керівна для спаської світи нижньої крейди мікрофауна: Heterohelix sp., Hedbergella sp., Anomalina sp., Gaudryina sp., Lenticulina sp., Textularia sp., Ammodiscus sp., Cibicidoides cf.djafarovi (Agalarova) та інші.

З відібраних взірців порід були виготовлені шліфи, за якими були проведені літологічні та мікроскопічні дослідження, що вказали на присутність великої кількості органіки в породі (рис. 6).

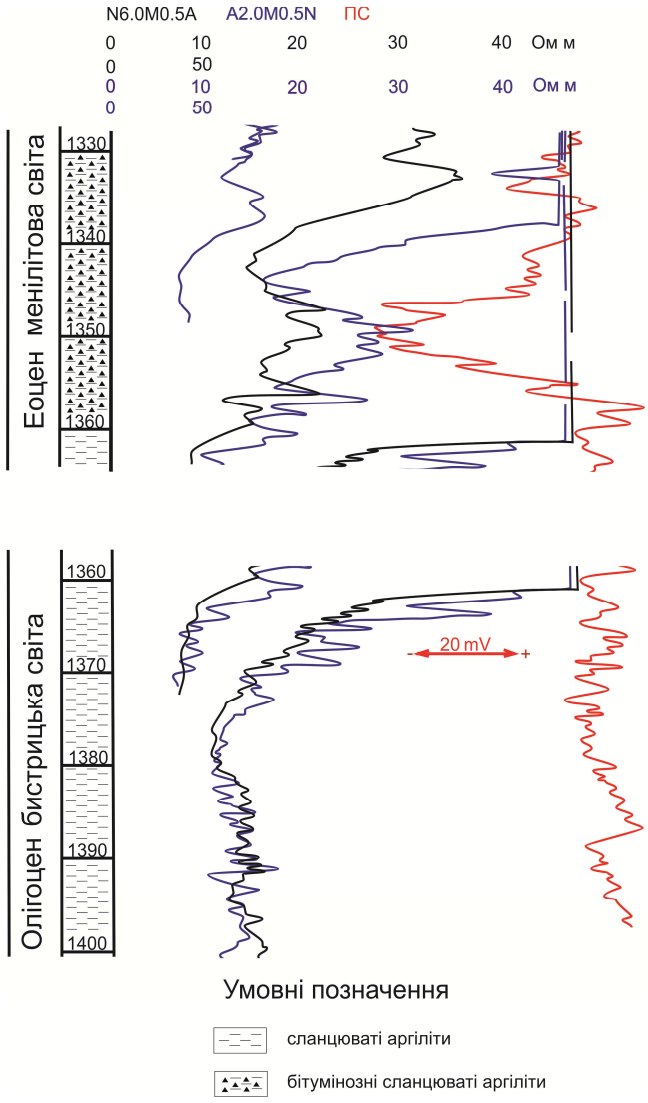


Рисунок 2 – Кореляційна схема відкладів менілітової та бистрицької світ свердловини 1 - Верхня Луква

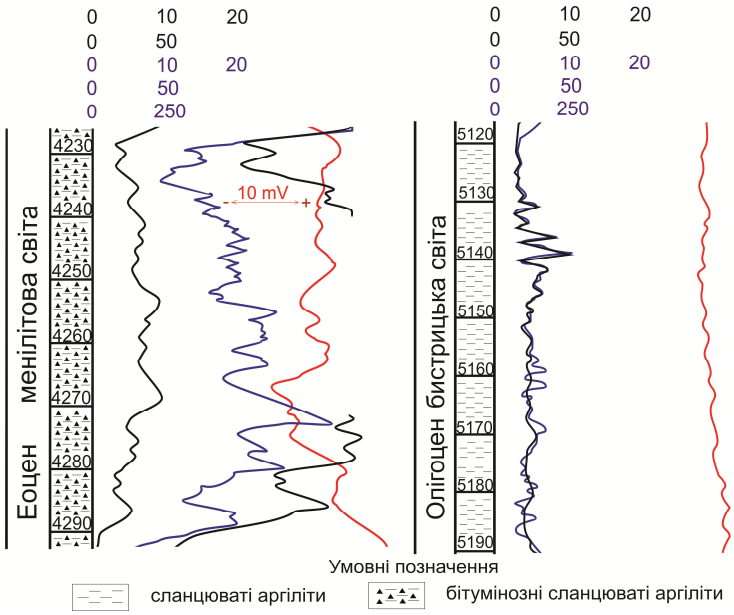


Рисунок 3 – Кореляційна схема відкладів менілітової та бистрицької світ свердловини 2 - Рожнятів

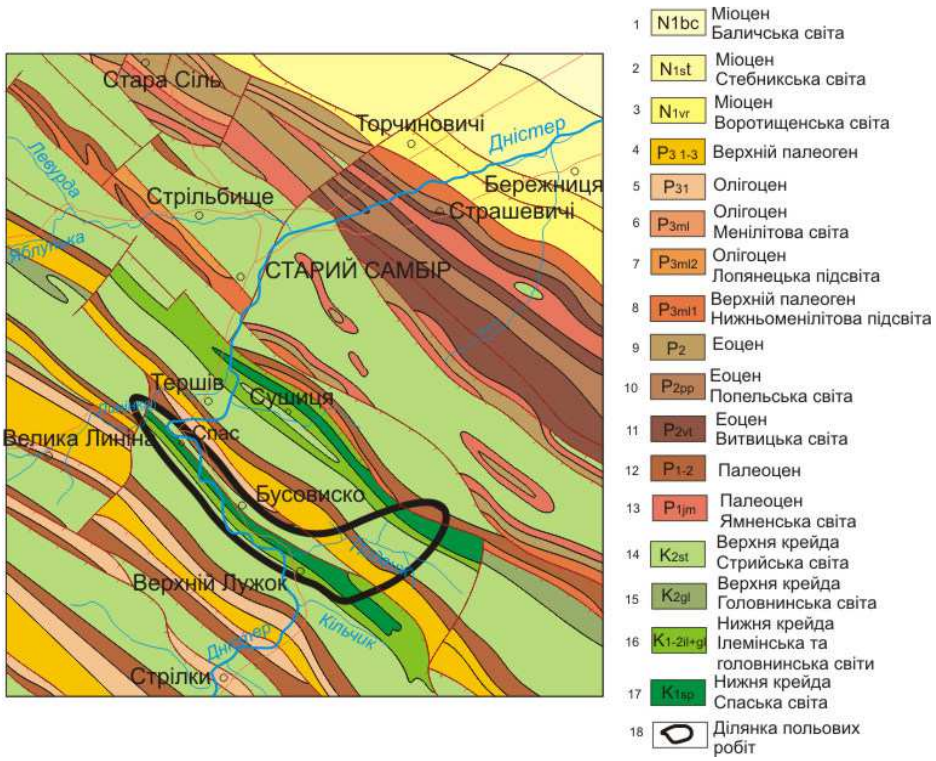
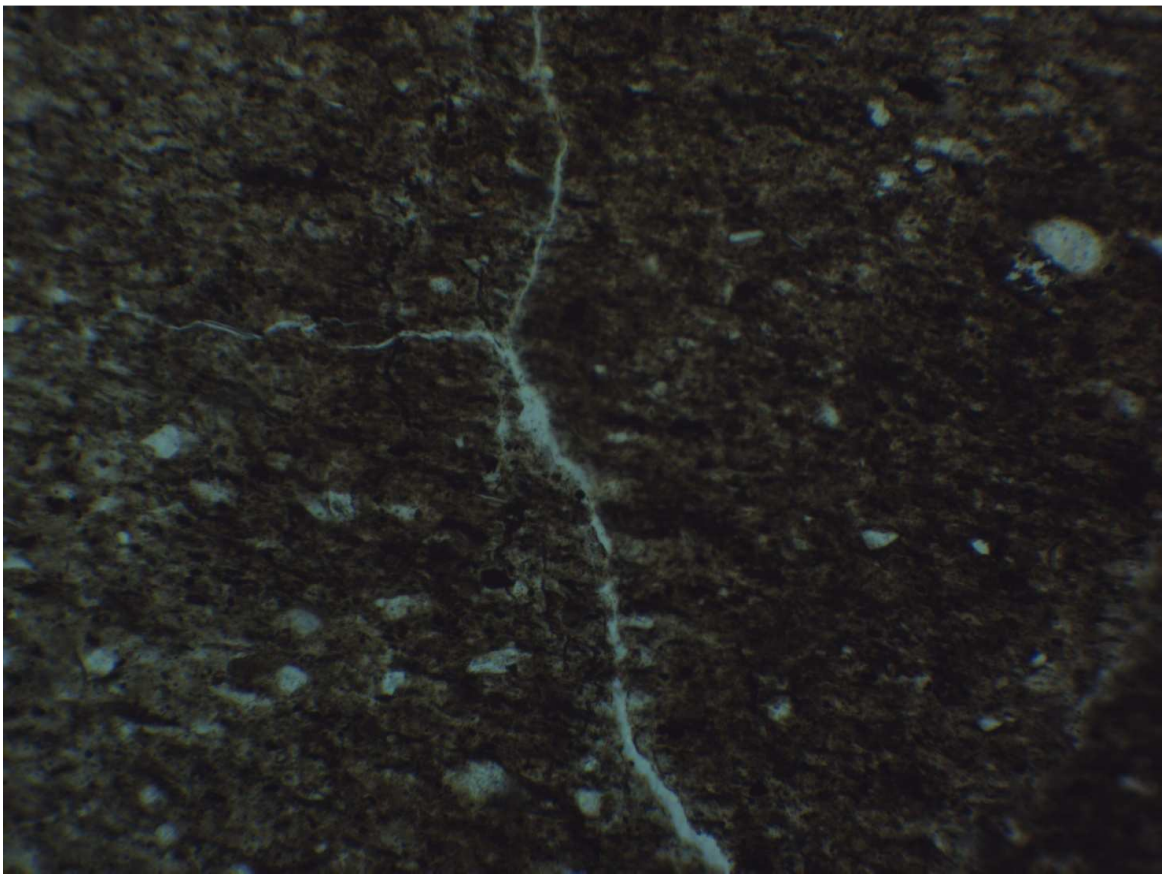


Рисунок 4 – Фрагмент геологічної карти площі досліджень

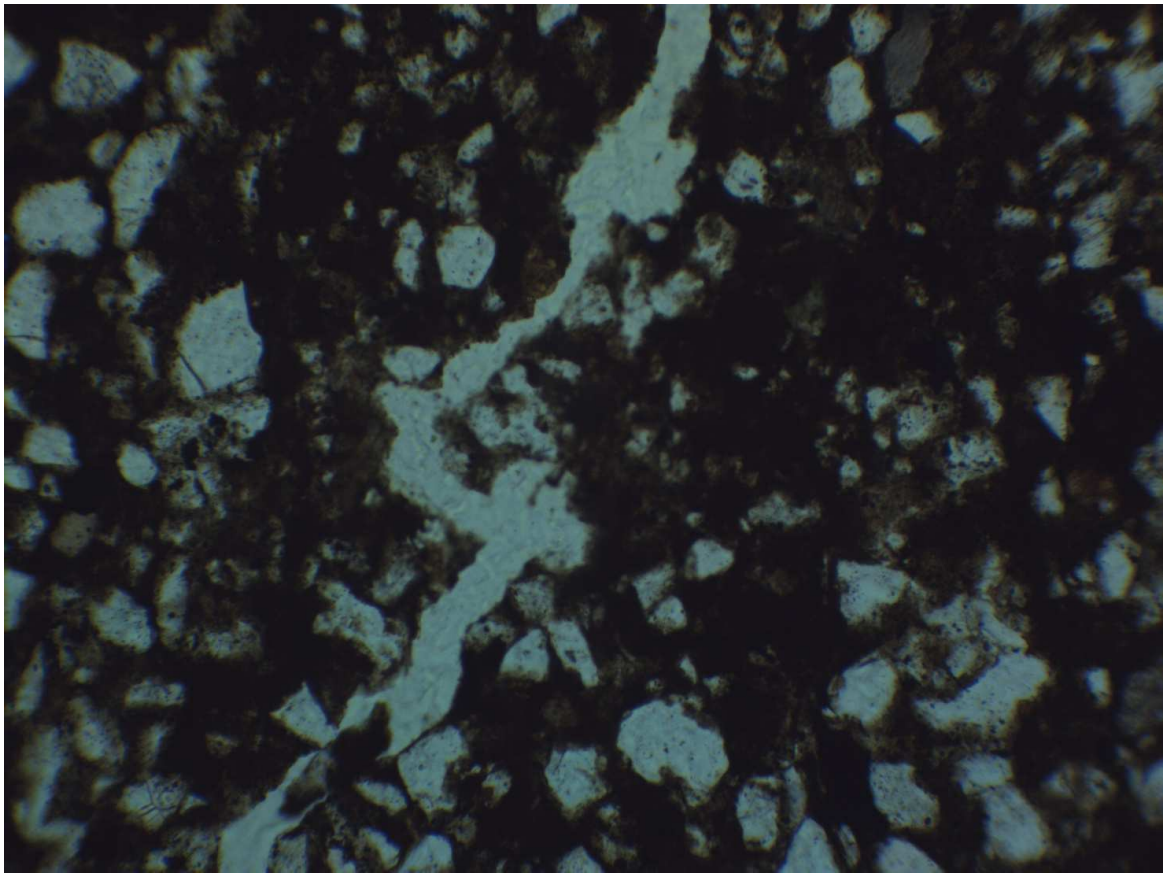


Рисунок 5 – Виположування порід спаської світи у відслоненні р. Подвиж, однієї з приток р. Дністер. Розріз є шаруватою товщею темного кольору аргілітів, алевролітів та пісковиків (фото Мазур А.П.)

Згадані зрізи сланцевих порід збільшені у сто сімдесят вісім разів (алевритистий сланець, сланцевий аргіліт, алевроліт та сланець). В першому шліфі помітні численні включення ОР, в невеликій кількості зустрічається глауконіт. В другому - шліфі, який був зроблений з паралельного зрізу алевритистої породи із високим вмістом зерен піску, теж помітно, що вона сильно збагачена ОР, у невеликій кількості присутній кварц. Третій та четвертий шліфи - зрізи чорного сланцю паралельний та перпендикулярний відповідно. На них помітно, що порода сильно тріщинувата. П'ятий шліф є перпендикулярним зрізом тієї ж алевритистої породи, яка представлена у другому шліфі. Останній шліф теж візуально показує наскільки спаська світа нижньої крейди збагачена на ОР, в даному зрізі породи також трапляються залишки мікрофауни, які помітні при обстеженні шліфа під мікроскопом. Потрібно сказати, що зазвичай органічна речовина розміщується серед уламкового теригенного матеріалу, в даному ж випадку все навпаки, що досить чітко відображено на представлених рисунках.



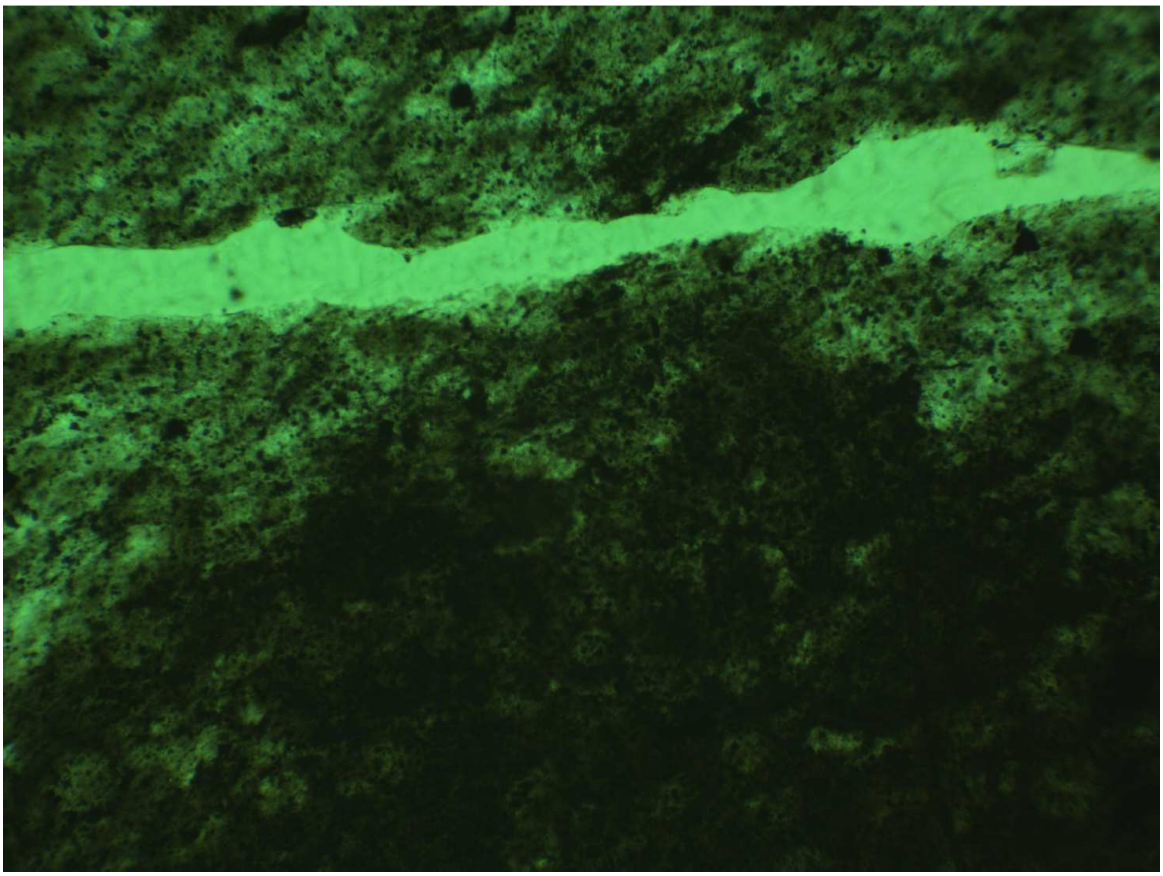
а)



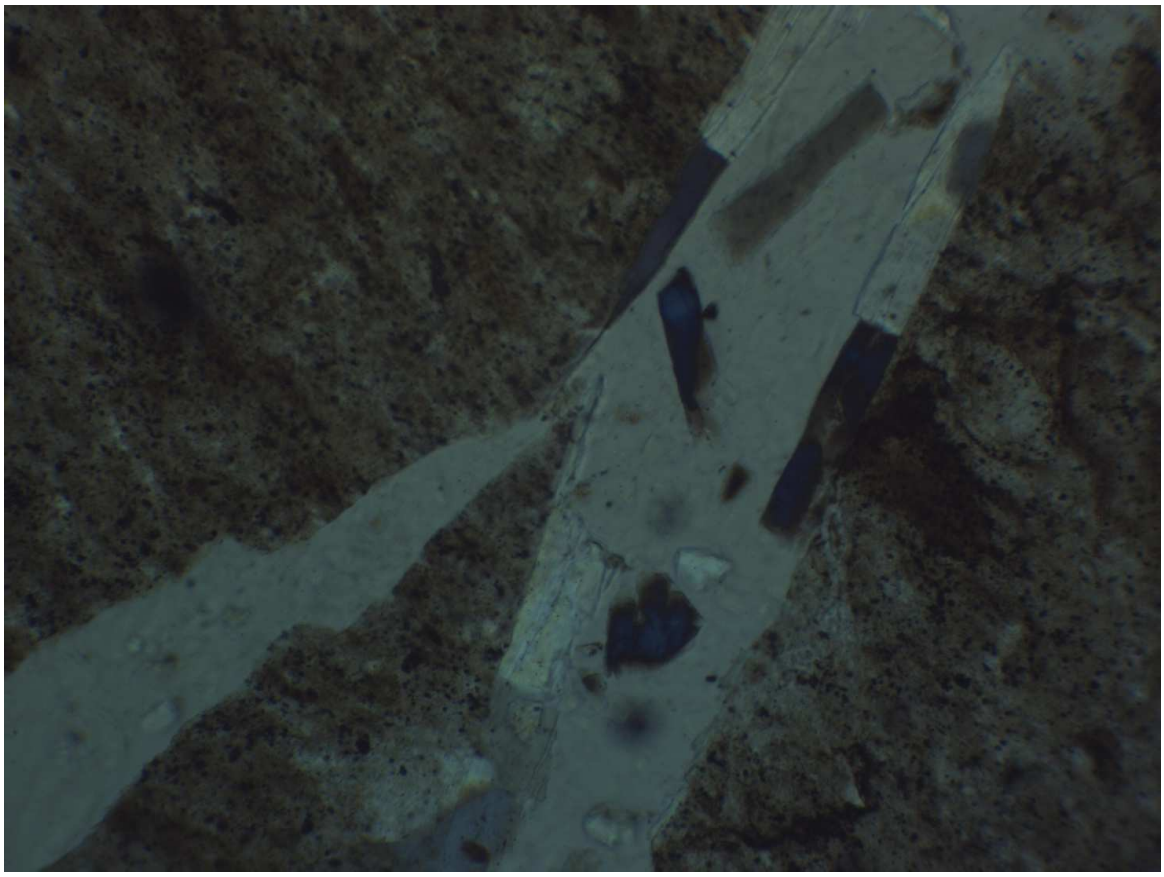
б)

а – алевритистий сланець; б – алевроліт

Рисунок 6 – Шліфи з порід спаської світи. Збільшення 178х (фото Боднарчука В.С.)
Аркуш 1



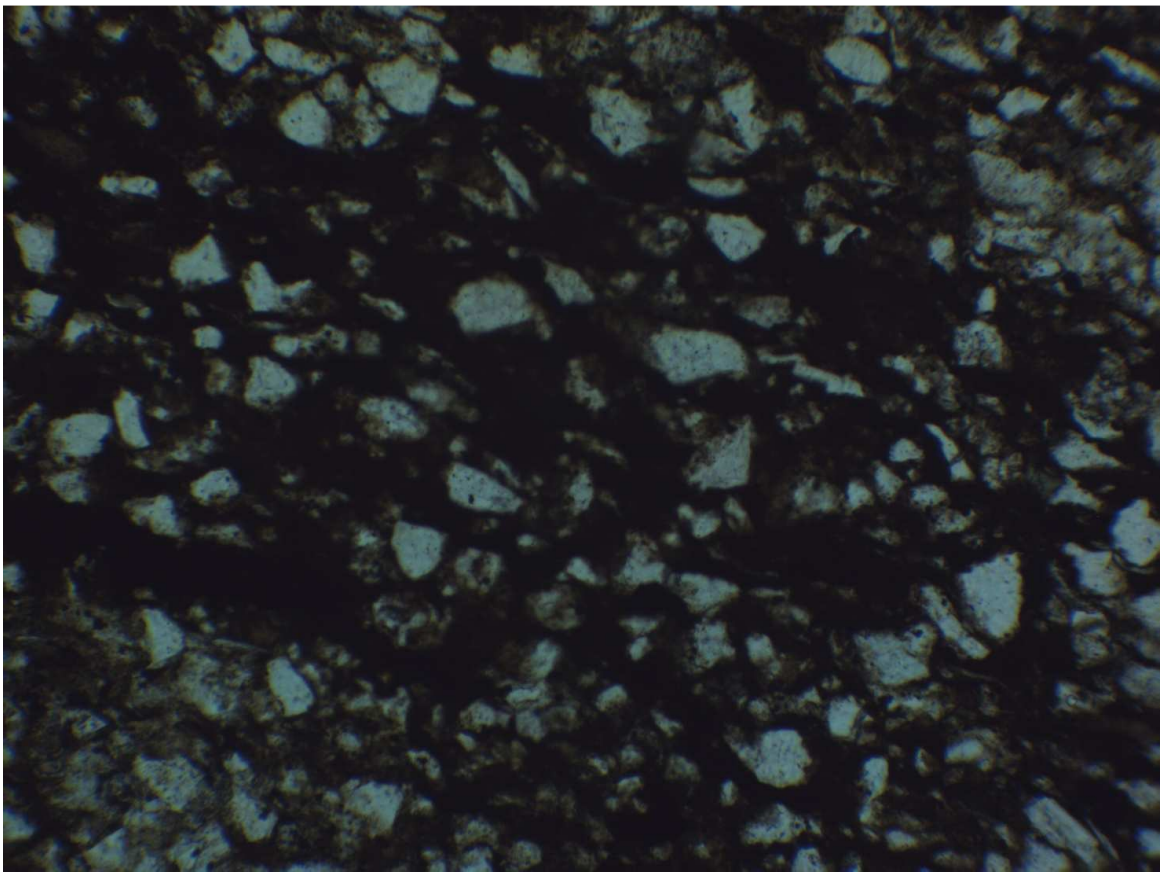
в)



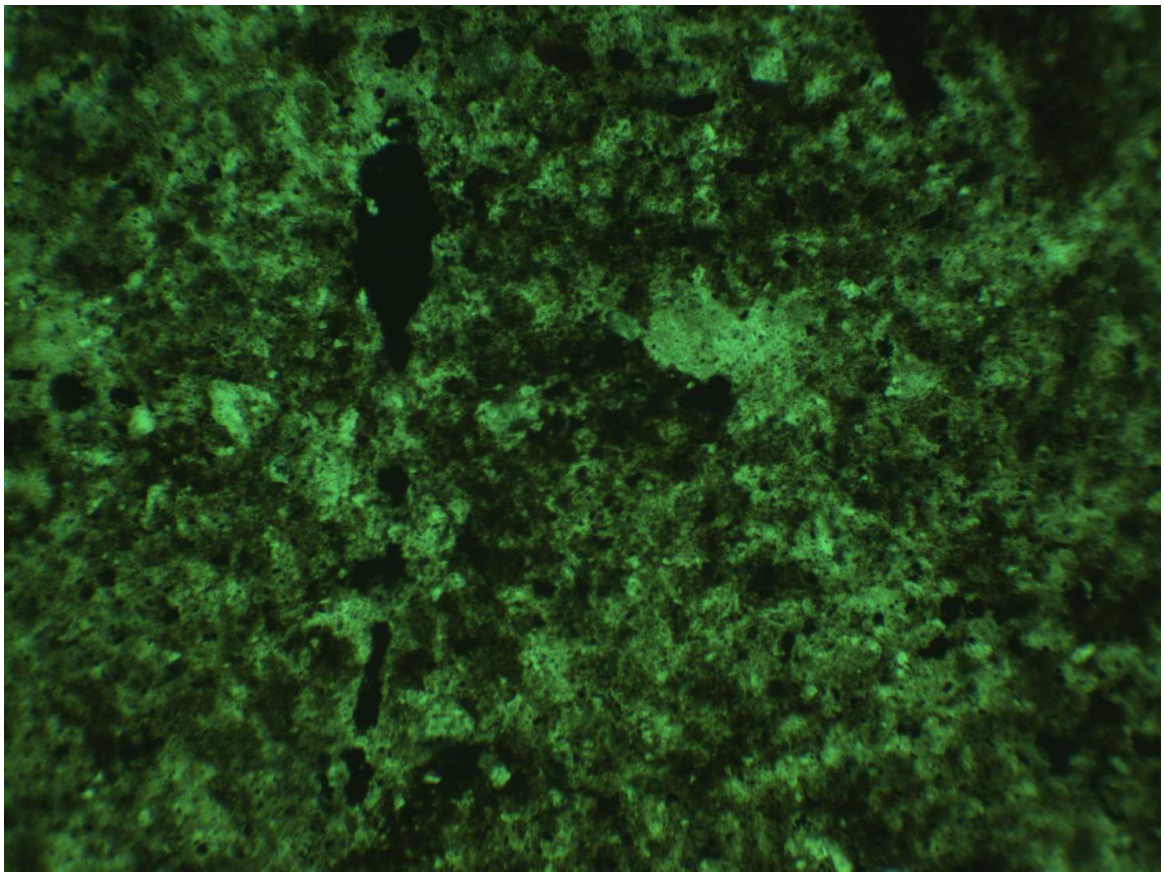
г)

в, г – чорний сланець

Рисунок 6 – Шліфи з порід спаської світи. Збільшення 178х (фото Боднарчука В.С.)
Аркуш 2



д)



е)

д – алевроліт; е – сланцевий аргіліт

Рисунок 6 – Шліфи з порід спаської світи. Збільшення 178х (фото Боднарчука В.С.)
Аркуш 3

Висновок 2. Отже, спаська світа нижньої крейди, ймовірно, є перспективним об'єктом на пошук, розвідку та видобування вуглеводневої сировини як в традиційних породах-колекторах, так і природного газу з бітумінозних аргілітів методом буріння горизонтальних свердловин з подальшими гідророзривами пластів.

До речі, у 1977 році, подібні до спаської світи відклади, були розкриті пошуково-розвідувальними свердловинами в межах Західносибірської платформи у верхньо-юрських осадах, з яких були одержані промислові дебіти нафти (100 і більше тон на добу).

Вказані відклади юри, як і спаська світа, складаються з чергування сланцевоподібних аргілітів і алевролітів, що раніше розглядалися як породи-покришки. Але вони виявились значно більш насичені нафогазоконденсатом і були описані в літературі як новий тип порід-колекторів - баженіти [9]. Вони мало чим відрізняються від темно- і чорносланцевих порід спаської світи, що були розкриті свердловиною Шевченково-1 в інтервалі 5280-5286 м. Походження вуглеводневих покладів баженітів більшість дослідників пов'язує з сланцюватістю та мікрокліважними тріщинами в породах, у які вуглеводневі флюїди відтискувалися безпосередньо з чорних аргілітів і сланців [1, 9, 10].

На даний час нами (Боднарчуком В.С., Мазур А.П. та Величенко Л.М.) продовжуються дослідження спаської світи нижньої крейди в Міжгірському районі Закарпатської області, де потужні пласти сланцюватих порід виходять на денну поверхню в руслі р. Ріка на території с. Майдан, яке розміщене в 20 км на північний захід від смт. Міжгір'я. В регіоні виходу гірських порід був проведений відбір взірців для подальших досліджень (рис. 7).

В геологічному відношенні, дана площа знаходиться в межах Кросненської зони Складчастих Карпат. Породи в межах даної території залягають під різними кутами від 45-65^0, проте, трапляються відслонення, з кутами 85-90^0. Інколи дані пласти використовуються місцевими жителями для переходу річки, як природні "геологічні мости" (рис. 8).

Відклади спаської світи в даному регіоні - це товщі сланцюватих аргілітів та сланців темного кольору (від сірого до чорного), подекуди зустрічаються пласти сірих та темно-сірих пісковиків. Аргіліти чорні, невапняковисті, м'які, тонкошаруваті, нерідко сильно перем'яті, крихкі. Великі кількості даних порід по площині нашарування або по тріщинах мають наліт гідроокису заліза. Аргіліти складаються з найменших пелітових частинок глинистих мінералів, які утворюють, разом з домішками пелітоморфного кремнезему (5-10%), досить однорідну основну масу, забарвлену тонкодисперсним піритом. В ній інколи присутня невелика кількість (до 10%) дрібних алевритових зерен кварцу, польових шпатів та лусок мусковіту.

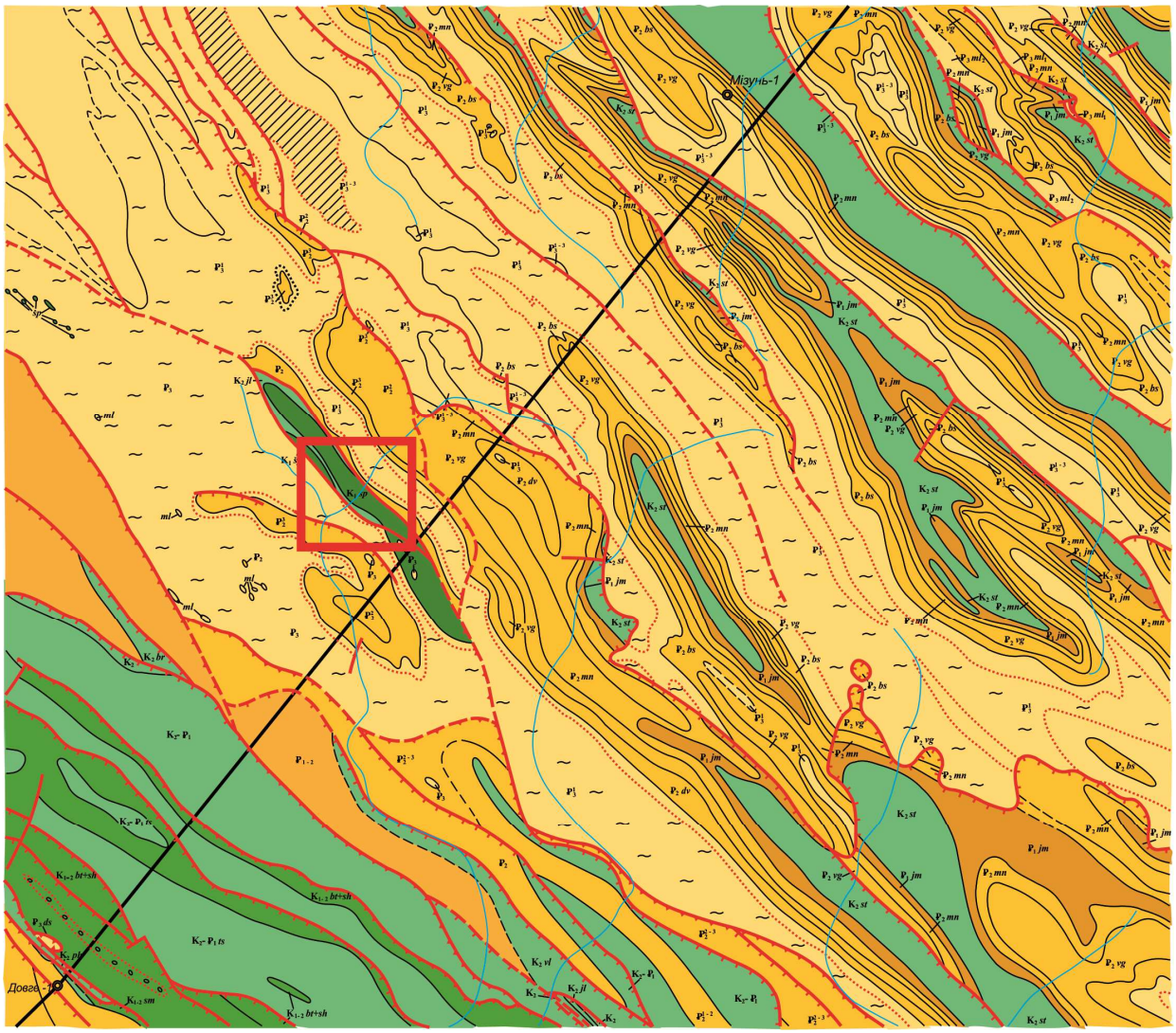
Структура сланцюватих аргілітів пелітова або алевроліто-пелітова, а текстура однорідна або мікрошарувата. Остання обумовлена нерівномірністю розповсюдження домішок і забарвлення порід. Їхня потужність інколи коливається до 2 м і більше. Зустрічаються також пісковики темно-сірі та сірі, кварцові, дрібнозернисті (рідко - середньозернисті), алевритові, кремнисті, інколи вапняковисті, дуже щільні та міцні, нерідко кварцитові, тонкошаруваті (0,1-1,5 м, рідше до 0,3 м), сильно тріщинуваті, озалізнені по тріщинам. Цемент кремнистий, глинисто-кремнистий або карбонатний. Текстура пісковиків однорідна та шарувата. При польових дослідженнях було виявлено відсутність реакції гірських порід з HCl.

Також виявлена смуга сланців червоного кольору, товщиною до 5 м. Цегляно-червоні утворення гідрооксидів заліза, які пов'язані з обезбарвлюванням чорних бітумінозних сланцюватих аргілітів та сланців, являють собою висохлу на сонці гелеподібну масу гідрооксидів заліза, що виникли за рахунок окислення піриту і органічних речовин. Беручи до уваги, що даний регіон знаходиться на схилах висот і часто можна побачити як грунтова вода виходить на поверхню не у вигляді ключа, а просочується крізь породи, розливаючись по площі на поверхні порід у відслоненнях (рис. 9). В межах цієї території через нагрівання з порівняно більшою інтенсивністю проходять процеси окислення піриту і органічних речовин. Окислене залізо залягає у вигляді гелю гідроокису і осідає на площинах нашарування та по щілинах, утворюючи мучнисті присипки, таким чином забарвлюючи ці невеликі площі в цегляно-червоний колір (рис. 10). Вони розташовуються на схилах у відслоненнях, які завжди розміщуються до сонця. Окислення піриту і органічних речовин викликає зміну кольору чорних порід.

Попередні макроскопічні дослідження відібраних з відслонень взірців порід дозволяють говорити про те, що вони збагачені ОР. Про це свідчить як їхнє чорне забарвлення так і запах бітумів у свіжому зламі гірських порід, що жирні на дотик.

Про наявність високого вмісту бітумоїдів також свідчить проведений в лабораторних умовах люмінісцентно-бітумінологічний аналіз відібраних у відслоненнях обох районів взірців. Бітуми зустрічаються різних типів. В основному це смолисті та маслянисто-смолисті бітуми. Результати лабораторних робіт минулих років свідчать про те, що потік газоподібних вуглеводнів на своєму шляху значно змінює склад, в тому числі аж до утворення смолистих речовин.

Вміст бітумів у досліджуваних породах коливається в широких межах від 0,04 до 1,25%, а у розчині в середньому - $3,1^x10^{-4}$ г/мл. Спираючись на лабораторні дослідження, які були проведені на багатьох родовищах нафти і газу, вміст бітумів не перевищував n^x10^{-4} %. В такому разі можна зробити висновок, що території досліджень достатньо багаті на бітуми. Вони - легкі, про що свідчить колір суміші подрібненої породи та хлороформу під ультрафіолетовим світлом. Їх забарвлення зазвичай яскраво-блакитне. Колір люмінісценції капілярних витяжок дозволив визначити, що бітуми, які



Неогенова система
N_1vr Воротищенська світа
N_1pl Поляницька світа
Палеогенова система
Олігоцен
P_3ml_3 Верхньоменілітова підсвіта
P_3ml_2 Середньоменілітова підсвіта
P_3ml_1 Нижньоменілітова підсвіта
Еоцен
P_2bs Бистрицька світа
P_2vg Вигодська світа
P_2mn Манявська світа
Палеоцен
P_1jm Ямненська світа
Крейдова система
K_2st Стрийська світа
K_1sp Спаська світа
геологічні границі
тектонічні порушення
річки
ділянка досліджень
лінії профілів
Довге -1 параметричні свердловини

Рисунок 7 – Фрагмент геологічної карти площі досліджень

містяться у породі – сапропелевого типу, тип бітумоїду – С. Провівши повний комплекс лабораторних досліджень, що включали в себе порівняння світіння бітумінозних включень безпосередньо у пробірках, порівняння капілярних витяжок, проведення крапельного аналізу (нанесення краплі нелюмінісцентного розчинника – хлороформу, $CHCl_3$) був зроблений висновок, що досліджувані породи перспективні в плані пошуків, розвідки і видобування газу з нетрадиційних порід-колекторів. Всі вище наведені результати отримані з порід спаської світи, відібраних у відслоненнях р. Дністер та її приток в районі м. Старий Самбір, р. Ріка – с. Майдан та у відслоненні менілітової світи в руслі р. Рибниця.



Рисунок 8 – "Геологічні мости" – вертикальне залягання бітумінозних сланців та пісковиків спаської світи нижньої крейди в р. Ріка (фото Величенко Л.М.)



Рисунок 9 – Ґрунтові води, що просочуються у відслоненні сланців червоного кольору спаської світи в руслі р. Ріка (фото Боднарчука В.С.)

Потрібно звернути особливу увагу на те, що в ході проведення польових геологічних досліджень у межах с. Майдан Закарпатської області, на північний-схід від автомобільного мосту, що знаходиться на крайньому рубежі населеного пункту на відстані близько 1,5 км, нами було виявлено невелике болото. Воно розміщене в 5-7 м від р. Ріка на одній із її терас. На даній ділянці був помічений інтенсивний вихід газу з водойми (рис. 11). Враховуючи, що цей регіон славиться своїми мінеральними джерелами, а поблизу знаходиться с. Сойми з джерелом мінеральної води, було висунуто припущення, що це вихід сірководню або звичайного болотного газу. Проте, після того як в південній частині болота були помічені маслянисті плівки на поверхні води (рис. 12) здійснено відбір проб газу та рідини для подальшого їх дослідження вже в лабораторних умовах.



Рисунок 10 – Вже окислені потужні товщі сланців спаської світи (фото Боднарчука В.С.)



Рисунок 11 – Вихід природного газу на терасі р. Ріка в районі с. Майдан (фото Мазур А.П.)

Висновок 3. Провівши лабораторні дослідження відібраних проб, було отримано позитивні результати, які свідчать про те, що в даній місцевості спостерігався вихід природного газу. Це підтверджується вуглеводневими компонентами, виявленими в ході аналізу (табл. 1). Але, оскільки проби відрізняються за вмістом, хоча відібрані в межах однієї території, згодом планується провести більш детальні польові геологічні дослідження даного регіону, бо на даному етапі ще не можливо зробити кінцевий висновок про причину відмінності в показниках.

Завдання подальших досліджень. Отже, бітумінозні відклади менілітової світи олігоцену та спаської світи нижньої крейди є перспективними для пошуків, розвідки і розробки покладів природного газу з нетрадиційних порід-колекторів.



Рисунок 12 - Маслянista жирна плівка на болоті в регіоні досліджень, с. Майдан (фото Боднарчука В.С.)

Таблиця 1 - Результати лабораторного аналізу відібраних проб газу в Міжгірському районі Закарпатській області в межах території виходу на денну поверхню порід спаської світи нижньої крейди

Дата	Місце відбору	Одиниці виміру	Склад газоповітряної суміші											Сума
			CH_4	C_2H_6	C_2H_4	C_3H_8	C_3H_6	і-C_4H_{10}	н-C_4H_{10}	C_4H_8	і-C_5H_{12}	н-C_5H_{12}	C_6H_{14}+в	CH_4-C_6H_{14} мг/м^3
04.09.12	Проба 1	%, $^x 10^{-4}$	564,230	0,117	1,866	0,097	0,042	0,083	0,051	0,097	0,066	0,340	-	
		мг/м^3	403,853	0,157	2,336	0,191	0,079	0,215	0,133	0,242	0,211	0,105	-	407,602
04.09.12	Проба 2	%, $^x 10^{-4}$	15,863	0,026	0,091	0,726	0,000	1,237	0,21	0,065	0,213	0,308	-	
		мг/м^3	11,354	0,035	0,114	1,428	0,000	3,208	0,545	0,209	0,686	0,08	-	17,886
04.09.12	Проба 3	%, $^x 10^{-4}$	5,258	0,047	0,220	0,236	0,067	0,416	0,097	0,098	0,124	0,185	-	
		мг/м^3	3,763	0,063	0,275	0,465	0,126	1,078	0,252	0,246	0,400	0,058	-	7,010

На даному етапі досліджень можна навіть зробити припущення, що на досліджуваній ділянці товща спаської світи нижньої крейди газоносна. Природній газ, що виділяється з порід цієї товщі, є наслідком його вертикальної міграції навіть до денної поверхні, тобто дизміграції з газових джерел, які зосереджені в нижньокрейдовій товщі на ще невизначених глибинах. Вказане свідчить про високу перспективність щодо пошуків і видобування природного газу з спаської світи нижньої крейди Закарпаття як з традиційних, так і нетрадиційних колекторів. Тому, можливо в майбутньому рекомендувати дану територію для більш детальних та ретельних пошуків і розвідки на природній газ.

Отже, беззаперечним є той факт, що пошуки і розвідка природного газу з нетрадиційних колекторів є перспективними, особливо, для нашої держави, яка є залежною від інших країн в плані вуглеводневої сировини. Проте, слід зауважити, що екологічні аспекти видобутку вуглеводневих енергоносіїв з нетрадиційних колекторів, таких як сланці, сланцюваті аргіліти та алевроліти, що вивчені недостатньо для застосування коврового методу вилучення в межах густозаселених західних областей України, особливо це стосується буріння горизонтальних свердловин до 5 км у великій кількості під населеними пунктами [11]. Тому, ми пропонуємо кардинально інший підхід у вирішенні даної проблеми, а саме проведення робіт на старих, вже забруднених вуглеводневих родовищах, шляхом буріння горизонтальних свердловин в товщах, що вважалися покришками, проте, дуже збагачених ОР, як наприклад, сланцюваті аргіліти менілітової світи, спаської світи, глинисті товщі неогену Зовнішньої зони Передкарпатського прогину, Волино-Подільської плити і навіть Закарпаття, що розглядається нами більш детально в опублікованій статті [1, 7, 12]. Але у вказаних товщах необхідно в майбутньому провести детальні палео-

геотермічні дослідження для визначення стадій катагенезу ОР у газові вуглеводні, шляхом дослідження її оптичних властивостей.

Сприятливі умови при проведенні робіт на старих вуглеводневих родовищах для інвесторів є наступні:

1. У випадку видобування природного газу і нафти у геосинклінальних зонах Карпат, можна здійснити буріння горизонтальних свердловин в двох-чотирьох тектонічних поверхах.

2. З кожного тектонічного поверху можна бурити декілька горизонтальних свердловин з одного стовбура.

3. Тектонічні поверхи обмежені регіональними тектонічними насувами, особливо у Внутрішній зоні, де нафтогазові родовища розміщені під Береговою скибою Скибової зони Карпат.

4. Райони старих вуглеводневих родовищ вже обладнані під'їзними шляхами, а також трубопроводами, які з'єднані з центральними газомагістралями.

Література

1 Орлов О.О. Бітумонафтогазогеологічне районування і напрямки пошуків нафти і газу в нетрадиційних колекторах західних областей України [Текст] / О.О. Орлов, В.С. Боднарчук, Ю.А. Калиній, А.П. Мазур // Науковий вісник ІФНТУНГ. – 2012. – №3 (33). – С. 17-29.

2 Орлов А.А. Аномальные пластовые давления в нефтегазовых областях Украины [Текст] / А.А. Орлов. – Львов: Вища школа, 1980. – 188 с.

3 Быховер Н.А. Геология и полезные ископаемые Карпат [Текст] / Н.А. Быховера. – Москва-Ленинград: Госиздатгеолит, 1941. – 642 с.

4 Порфірьєв В.Б. Бітумні сланці УРСР [Текст] / В.Б. Порфірьев, І.В. Грінберг, Н.Р. Ладиженський, К.А. Галабурська. – Львів, 1961. – 827 с.

5 Порфирьев В.Б. Менилитовые сланцы – сырье для промышленности – строительный материал / В.Б. Порфирьев, И.В. Гринберг, Н.Р. Ладыженский [и др.]. – Киев: АН УССР, 1956. – 367 с.

6 Орлов О.О. Виявлення нафтопродукуючих порід у Карпатах [Текст] / О.О. Орлов // Нафтова і газова промисловість. – 1992. – №2. – С. 37-43.

7 Орлов О.О. Сланцевий і вугільний газ та інші джерела енергоносіїв майбутнього [Текст] / О.О. Орлов, В.Г. Омельченко, А.В. Локтєв. – Івано-Франківськ: Симфонія форте, 2012. – 152 с.

8 Орлов О.О. Перспективи пошуків нафти і газу у нетрадиційних колекторах Західного бітумонафтогазоносного регіону [Текст] / О.О. Орлов, М.І. Євдощук, В.С. Боднарчук: Матеріали міжнародної науково-практичної конференції ["Стан, проблеми та перспективи нафтогазової промисловості України"]. – Бориславі: Вид-во Львівської політехніки, 2012. – С. 43-44.

9 Нестеров И.И. Новый тип коллектора нефти и газа [Текст] / И.И. Нестеров // Геология нефти и газа. – 1979. – №10. – С. 26-29.

10 Пути повышения эффективности поисков залежей нефти и газа в пластах $Ю_0$, $Ю_1$ и $Ю_2$-$Ю_{20}$ юрских отложений Среднего Приобья [Текст] / А.А. Орлов, М.Д. Журакивский, М.В. Ляху, Е.М. Старосельский // Известия высших учебных заведений. Нефть и Газ. – 1986. – С. 6-8.

11 Гідравлічний розрив у Європі: благо чи нещастя [Текст] / Авізер Такер: Матеріали міжнародної конференції ["Нетрадиційний природний газ: стратегії енергетичної безпеки України"]. – Івано-Франківськ: вид-во ІФНТУНГ, 2012.

12 Орлов О.О. Основні об'єкти пошуків газу в бітумінозних відкладах в західних областях України [Текст] / О.О. Орлов, В.С. Боднарчук. // Вісник харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. – 2012. – №997. – С. 50-58.

Стаття надійшла до редакційної колегії 06.03.12

Рекомендована до друку професором ***Орловим О.О.*** *(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ) професором* ***Карпенком О.М.*** *(НТУУ «КПІ», м. Київ)*

Техніка і технології

УДК 622.692.4

КОРОЗІЙНО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ МАГІСТРАЛЬНИХ ТРУБОПРОВОДІВ

Д.Ю. Петрина, О.Л. Козак, Ю.Д. Петрина

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 42153,
e-mail: d r i l l @ n u n g . e d u . u a

Останнім часом причиною експлуатаційних пошкоджень магістральних трубопроводів все частіше стають зварні з'єднання. За сумісної дії механічних навантажень і робочих середовищ зварні з'єднання мають підвищену схильність до крихкого руйнування. Цьому сприяє їх макро- і мікронеоднорідність за хімічним складом, структурою та механічними властивостями.

Фізико-механічні та електрохімічні властивості вихідних зварних з'єднань (зварюються дві неексплуатовані труби) до певної міри вивчені. Однак під час ремонту трубопроводів до експлуатованої труби приварюється котушка з труби запасу. Це може змінити структурний стан матеріалу в зоні термічного впливу і призвести до зміни корозійно-механічних властивостей металу.

Матеріалу зони термічного впливу досліджуваних зварних з'єднань сталі 17Г1С властива мікроструктура стовпчастих кристалітів. Проте для ремонтних швів мікроструктура кристалітів була більш крупнозернистою порівняно з вихідними.

Виявлено аномалію у механічній поведінці матеріалу зони термічного впливу ремонтних швів, що проявляється в зниженні твердості НВ, характеристик міцності $\sigma_в$ і $\sigma_{0,2}$ за одночасного зменшення відносного звуження ψ, ударної в'язкості, статичної та циклічної тріщиностійкостей.

Найвища інтенсифікація корозії відбувається в матеріалі зони термічного впливу ремонтних швів, де також існує велика імовірність появи додаткової вибіркової корозії.

В роботі використано п'ять схем навантаження та наводнювання досліджуваних зразків. Показано, що матеріал зони термічного впливу ремонтних швів зварних з'єднань сталі 17Г1С проявив себе як більш чутливий до водневого окрихчення порівняно з матеріалом зони термічного впливу вихідних зразків.

Встановлено втомну чутливість електрохімічних показників до структурно-хімічної неоднорідності різних зон зварного з'єднання трубопроводу.

Ключові слова: характеристики міцності, пластичність, ударна в'язкість, поляризаційний опір, стаціонарний потенціал, воднева крихкість, електрохімічна гетерогенність.

В последнее время причиной эксплуатационных повреждений магистральных трубопроводов все чаще становятся сварные соединения. При совместном воздействии механических нагрузок и рабочих сред сварные соединения имеют повышенную склонность к хрупкому разрушению. Этому способствует макро- и микронеоднородность по их химическому составу, структуре и механическим свойствам.

Физико-механические и электрохимические свойства исходных сварных соединений (свариваются две неэксплуатируемые трубы) в определенной мере изучены. Однако при ремонте трубопроводов эксплуатируемой трубе приваривается катушка трубы запаса. Это может изменить структурное состояние материала в зоне термического влияния и привести к изменениям коррозионно-механических свойств металла.

Материалы зоны термического влияния исследуемых сварных соединений стали 17Г1С свойственна микроструктура столбчатых кристаллитов. Однако для ремонтных швов микрострура кристаллов была более крупнозернистой по сравнению с исходными. Обнаружена аномалия в механическом поведении материала зоны термического влияния ремонтных швов, что проявляется в снижении твердости НВ, прочностных $\sigma_в$ и $\sigma_{0,2}$ при одновременном уменьшении относительного сужения ψ, ударной вязкости, статической и циклической трещиностойкостей.

Высокая интенсификация коррозии наблюдается в материале зоны термического влияния ремонтных швов, где также существует большая вероятность появления дополнительной выборочной коррозии.

В работе использовали пять схем нагрузки и наводораживания исследуемых образцов. Показано, что материал зоны термического влияния ремонтных швов сварных соединений стали 17Г1С проявил себя более чувствительным к водородной хрупкости по сравнению с материалом этой зоны в исходных образцах.

Установлена усталостная чувствительность электрохимических показателей к структурно-химической неоднородности различных зон сварного соединения трубопровода.

Ключевые слова: характеристики прочности, пластичность, ударная вязкость, поляризационное сопротивление, стационарный потенциал, водородная хрупкость, электрохимическая гетерогенность.

Welded joints have recently become the reason of operational damages of the main pipelines even more often. On joint action of mechanical loadings and working environments welded have the raised propensity to brittle fracture. Macro and microheterogeneity by a chemical compound, structure and mechanical properties lead to this phenomena.

Physicomechanical and electrochemical properties of initial welded joints (welding of two unexploited pipes) are studied to f certain extend. However while maintenance pipelines stock pipe spool is welded. It can change a structural condition of a material in area of thermal influence and it canlead to changes of corrosive and mechanical properties of metal.

Materials of area of thermal influence of investigated welded joints of a steel 17Г1С the microstructure of columnar crystals is peculiar. However, for maintenance seams it was more hard-grained in comparison with initial. There is the anomaly in mechanical behaviour of a material area of thermal influence of maintenance seams that is shown in decrease in hardness HB, durabilits characteristics $\sigma_в$ and $\sigma_{0,2}$ at simultaneous reduction of cross-sectional area ψ, impact strength, static and cyclic crack resistance.

The high intensification of corrosion occurs in a material area of thermal influence of maintenance seams in which there is also a high probability of occurrence of additional selective corrosion.

Five schemes of loading and hyarogenation of investigated samples of used. It is shown, that the material area of thermal influence of maintenance seams of welded joints of a steel 17Г1С has proved more sensitive to hydrogen induced cracking in comparison with a material of this area of initial samples.

Fatigue sensitivity of electrochemical indicators to structurally-chemical heterogeneity of various areas of welded joints of the pipeline established.

Keywords: durability characteristics, plasticity, impact strength, polarising resistance, stationary potential, hydrogen embrittiement, electrochemical heterogeneity

Більшість магістральних нафтогазопроводів (НГП) України експлуатуються тривалий час, що призводить до постійного зростання їх відсотку із відпрацьованим нормативним терміном [1, 2]. Різноманітні обстеження магістральних трубопроводів (МТ) свідчать, що останнім часом причиною їх експлуатаційних пошкоджень все частіше стають зварні з'єднання (ЗЗ) [3-7]. Це стосується, в першу чергу, багатошарових монтажних швів, які після зварювання практично не піддаються технологічним обробкам з метою зменшення залишкових напружень. За сумісної дії механічних навантажень і робочих середовищ ЗЗ мають підвищену схильність до крихкого руйнування. Цьому сприяє їх макро- і мікронеоднорідність за структурою, хімічним складом і механічними властивостями. Саме тому в процесі будівництва МТ гостро стоїть проблема виконання зварювальних робіт з високою продуктивністю та стабільною якістю, оскільки зварювання великою мірою визначає довговічність магістральних НГП та їхню експлуатаційну безпеку [8].

Механізоване зварювання застосовують у промисловості близько 55 років, однак його частка в споруджені МТ на території СНД досі залишається незначною [9]. Водночас ручне зварювання досягло високої продуктивності та якості завдяки застосуванню поточно-роздільного та поточно-групового методів [10]. Проведені наукові дослідження проблем механізації зварювальних робіт показали, що основними перешкодами для їх розширеного впровадження є дефекти ЗЗ, що виникають за різних недоліків технологічного процесу зварювання (западання валиків швів під час виконання облицювальних проходів, підвищене розбризкування електродного металу тощо) [11]. Тому для забезпечення високої якості ЗЗ процеси механізованого зварювання потребують подальшого розвитку та вдосконалення.

Збільшення експлуатаційного ресурсу МТ безпосередньо пов'язане з подальшим підвищенням якості ЗЗ за високої продуктивності зварювання. На даний час ми маємо вже низку вітчизняних розробок, які відповідають вказаним задачам [12-14]. В роботі [15] проаналізовано технологічні особливості, режими зварювання і властивості зварних з'єднань основних сучасних способів з'єднання МТ. Показано, що термін експлуатації багатьох НГП досяг 40 років, однак до сьогоднішнього дня не зафіксовано жодної відмови з'єднання.

Однак навіть найбільш якісні зварні шви в процесі довготривалої експлуатації деградують, що зрештою призводить до їх руйнування. Надзвичайно важливо встановити механізми руйнування зварних швів, отриманих за різними технологіями, вивчити їх спорідненість і відмінності. В цьому напрямку перші дослідження вже проводяться [4-7, 16, 17]. Особливу увагу слід звернути на вивчення надійності ще одного виду зварних швів – ремонтних. За наявності в тілі труби тріщиноподібних дефектів, ця частина її вирізається з трубопроводу. На вільне місце встановлюється котушка з вихідного матеріалу і приварюється до експлуатованого металу. Така технологія може суттєво змінити структурний стан сталі від зварного шва до основного експлуатованого матеріалу. А це, в свою чергу, призводить до зміни корозійно-механічних властивостей металу в згаданому діапазоні. Натомість нам зовсім не траплялись роботи, в яких би вивчалось це питання. Тому його актуальність і своєчасність не викликає ніяких сумнівів.

Мета даної роботи – провести порівняльну оцінку корозійно-механічних властивостей різ-

них зон вихідного та ремонтного зварних з'єднань сталі 17Г1С.

В червні 2010 на газопроводі, який підпорядкований УУМГ «Прикарпаттрансгаз», відбулася аварія - розрив по кільцевому зварному шву (рис.1).

Поверхня зламу такого шва піддавалася візуальному фрактографічному аналізу. Ніяких пластичних скосів під кутом 45^0 не спостерігалося. Отже, характер руйнування був повністю крихким. Загальновідомо, що такий вид руйнування особливо чутливий до сумісної дії напружено-деформованого стану конструкції та робочого середовища, а також макро- і мікронеоднорідності за структурою, хімічним складом і механічними властивостями. Це властиво, в першу чергу, кільцевим ЗЗ, які не піддаються термічній обробці після зварювання, залишкові напруження в них не усуваються, стаючи вогнищами зародження тріщиноподібних дефектів.

Аналіз руйнування зварного шва показав, що найбільша густина мікротріщин зосереджена в навколошовний ділянці. Звідси починаються корозійні процеси. Корозійна тріщина росте вздовж і в напрямку до ЗЗ. Відтак, перетнувши, його, переходить на протилежну за швом навколошовну ділянку. Як видно з рис. 1, ЗЗ по кільцю свого тіла не руйнується. Отже, відповідальними за руйнування ЗЗ є дефекти навколошовних ділянок. На наш погляд, це пов'язано із високою електрохімічною гетерогенністю ЗЗ, що призводить до активізації локальних корозійних процесів як у металі зони термічного впливу (ЗТВ), так і в металі зварного шва (ЗШ).



Рисунок 1 – Вид зруйнованого зварного шва

Дослідження проводили на зразках ремонтних стикових ЗЗ зі сталі 17Г1С, вирізаних з труби запасу і з котушки діаметром 1220 мм товщиною стінки 12 мм з трубопроводу «Угерсько-Чернівці», термін експлуатації якої становив 31 рік.

Аналогічні випробування проводили на стиковому ЗЗ сталі 17Г1С, вирізаному з труби запасу.

Зразки зварних з'єднань виготовляли з V-подібною підготовкою кромок. З'єднання отримували ручним електродуговим зварюванням електродами УОНИ-13/55 Ø5-УД1, які попередньо прогрівались протягом однієї години за температури 560 К і сили струму 210 А. Джерелом живлення слугував випрямляч зварний типу ВКС-500-1. Кут наплавлення шва складав 90^0. Механічні властивості визначали розтягом зі швидкістю деформування $3\cdot10^{-3}c^{-1}$ на машині УМЕ-10Т циліндричних зразків діаметром робочої частини 5 мм і довжиною 25 мм. Зразок охоплював всі зони ЗЗ: зварний шов (ЗШ) у центрі завширшки 3…4 мм, ЗТВ – до 11 мм по обидва боки від ЗШ і основний метал (ОМ). У певній зоні ЗЗ виконували кільцевий концентратор напружень глибиною 1 мм. При цьому отримували умовні характеристики міцності (границя міцності $\sigma_в$ і границя плинності $\sigma_{0,2}$) та пластичності (відносне звуження ψ). Ударну в'язкість KCV визначали за Шарпі, а статичну тріщиностійкість – за J_{1c} [18].

Істотне значення має врахування структурних змін, що виникають у металі під час зварювання.

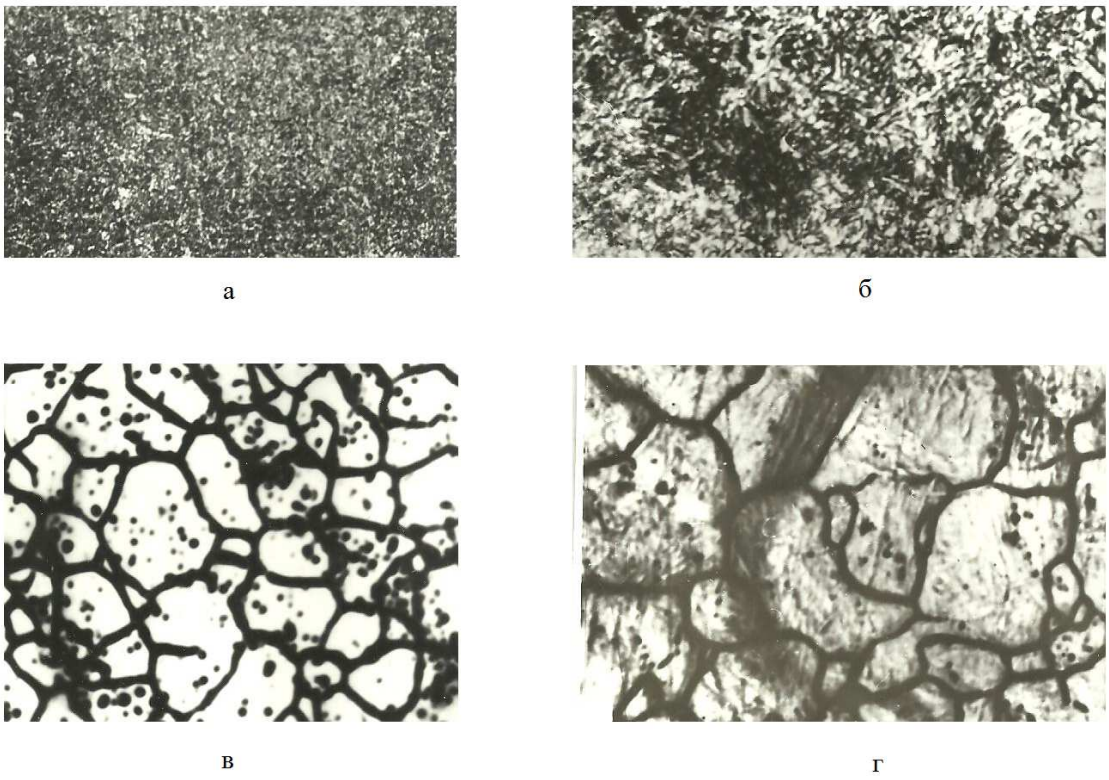
Структури МШ як вихідних, так і ремонтних зразків не виявили жодних відхилень, проте на відстані близько 7 мм від ЗШ структура металу таких зразків у ЗТВ суттєво змінилася (рис. 2).

Мікроструктури вихідних (рис. 2а) і ремонтних (рис. 2б) зразків ЗЗ сталі 17Г1С в ЗТВ – стовпчасті кристаліти. Однак в другому випадку вони є більш крупнозернистими. Це підтверджується зростанням розмірів зерен фериту (порівняти рис. 2в і 2г). Феритні зерна розмежовані карбідами, причому в ремонтних зразках ЗЗ розміри їх також більші, ніж у вихідних. Крупнозерниста зона має знижену корозійну стійкість і піддається сильній загальній корозії. Їй властива також підвищена чутливість до корозійного розтріскування.

Результати механічних випробувань вихідних і ремонтних зразків ЗЗ наведено в таблиці 1.

Зауважимо, що для KCV у чисельнику вказані середні значення результатів випробувань (не менше чотирьох зразків), а в знаменнику - найменші значення.

Як і очікувалося, всі механічні властивості МШ для вихідних і ремонтних зразків ЗЗ майже повністю співпадають. В свою чергу, механічні показники ОМ ремонтного зразка ЗЗ відповідали аналогічним параметрам деградованої протягом тридцяти одного року сталі 17Г1С. У всіх випадках випробувань твердість НВ змінювалася не суттєво. Механічні показники вихідних і ремонтних зразків ЗЗ для ЗТВ і ОМ майже не відрізняються в межах кожного стану зразків ЗЗ. Однак всі ремонтні зразки мали нижчі відповідні параметри, ніж вихідні зразки. Останнє



а б в г

а, б – х200; в, г – х600

Рисунок 2 – Мікроструктура (а, б) і величина аустенітного зерна (в, г) вихідних (а, в) і ремонтних (б, г) зразків ЗЗ сталі 17Г1С в ЗТВ

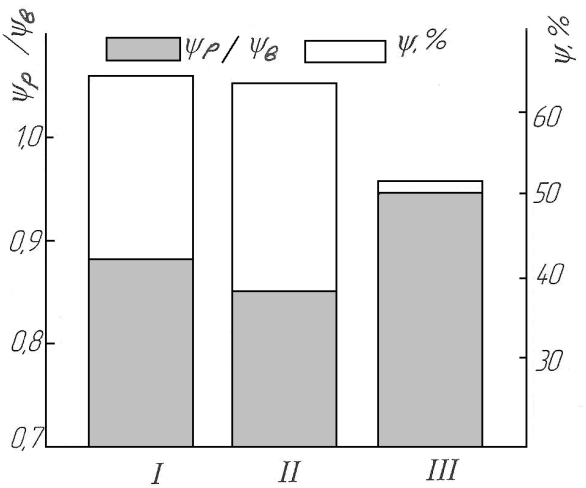
Таблиця 1 – Механічні властивості різних зон ЗЗ сталі 17Г1С

Зони ЗЗ	Стан зразка ЗЗ	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	НВ	ψ, %	KCV, Дж/см^2
МШ	Вихідний	942	753	207	51	232/192
	Ремонтний	940	755	208	48	230/190
ЗТВ	Вихідний	809	651	202	61	192/184
	Ремонтний	794	633	200	52	151/102
ОМ	Вихідний	796	653	187	62,5	274/260
	Ремонтний	785	627	183	55	203/160

свідчить, що ЗТВ, яка розміщена між МШ і ОМ експлуатованої труби, має підвищену чутливість до утворення тріщиноподібних дефектів. Це сприяє активізації локальних корозійних процесів і призводить до крихкого руйнування ЗЗ трубопроводу.

Для оцінки пластичності різних зон ЗЗ слугував параметр відносного звуження ψ. В роботах [1, 2, 7] показано, що це єдиний показник, який доцільно використовувати з цією метою. Для оцінки інтенсивності зміни пластичності різних зон ЗЗ ремонтних зразків порівняно із зразками вихідними використали відношення відносного звуження ремонтних зразків $\psi_р$ до відносного звуження вихідних зразків $\psi_в$, тобто $\psi_р/\psi_в$ (рис. 3).

З таблиці 1 і рис. 3 видно, що показник пластичності ψ для МШ знаходиться як для вихідного, так і для ремонтного зразків ЗЗ практично на одному рівні. Причому його величина є найменшою з усіх зон ЗЗ. Для ОМ і ЗТВ спостерігається спад механічних характеристик



I – ОМ; II – ЗТВ; III – МШ

Рисунок 3 – Вплив стану зразків ЗЗ на інтенсивність зміни пластичності різних зон ЗЗ сталі 17Г1С

$\sigma_в$ і $\sigma_{0,2}$ зразків ремонтного стану порівняно з вихідними зразками ЗЗ. Тому очікувалось певне зростання пластичності цих зон ЗЗ в ремонтних зразках. Однак, всупереч очікуванню, відносне звуження ψ ремонтних зразків також зазнало спаду. Тобто його поведінка була такою, як і у експлуатаційно деградованих трубних сталей [1, 2, 7, 17]. Найбільшого спаду величина ψ зазнала у ЗТВ. Наведені вище результати свідчать про те, що ЗТВ ремонтних зразків ЗЗ зазнала найбільшого окрихчення матеріалу, ніж ця ж зона вихідних зразків.

Що ж стосується ударної в'язкості, то найбільше її значення було зафіксовано для ОМ вихідного зразка ЗЗ – 274 Дж/см^2. При цьому дані експериментальних досліджень мали дуже малий розкид. Ударна в'язкість ОМ ремонтного зразка ЗЗ порівняно з попереднім випробуванням зменшилась на 26 %, зросло розсіювання експериментальних даних. Зауважимо, що випробування на ударну в'язкість обох типів зразків ЗЗ (вихідний і ремонтний) МШ показали практично один рівень KCV. Не було також різниці в оцінці розкиду експериментальних даних.

Порівняно з МШ ударна в'язкість вихідних зразків ЗЗ у ЗТВ спала на 17,2 %, а ремонтних зразків ЗЗ – на 34,3 %. Причому якщо в першому випадку дані експериментальних досліджень мали дуже малий діапазон розсіювання, то в другому він був найбільшим серед всіх проведених в даному напрямку випробувань. Отже, як у випадку оцінки пластичності, так і за випробувань на ударну в'язкість показано, що найінтенсивніше окрихчується метал ЗТВ у ремонтних зразках ЗЗ.

Відомо, що зміна мікроструктури сталі суттєво впливає на рівень статичної тріщиностійкості металу. Для її визначення нормативні документи України рекомендують користуватися критичним коефіцієнтом інтенсивності напружень при статичному руйнуванні в умовах максимального стиснення пластичної деформації K_{1c} [19, 20]. Однак визначити коректне значення K_{1c} для високопластичних трубних сталей за кімнатної температури випробувань не має змоги, оскільки в процесі руйнування не забезпечуються умови плоско-деформованого стану. Достовірну оцінку статичної тріщиностійкості трубної сталі 17Г1С можна виконати методом J-інтегралу [18]. В цьому випадку критичне значення J-інтегралу оцінювали за моментом початку поширення тріщини J_{1c}. Результати досліджень подані на рис. 4.

МШ вихідних і ремонтних зразків ЗЗ сталі 17Г1С мають найвищу статичну тріщиностійкість. Для обох станів зразків її величина практично однакова. Зміна мікроструктури сталі у ЗТВ помітно знижує величину параметра J_{1c}. Це зниження для вихідних зразків ЗЗ становить 15 % порівняно з МШ, а для ремонтних зразків ЗЗ – аж 40 %. Отже, як і у всіх попередніх випадках знову спостерігаємо погіршення механічних властивостей матеріалу ЗТВ у ремонтних зразках.

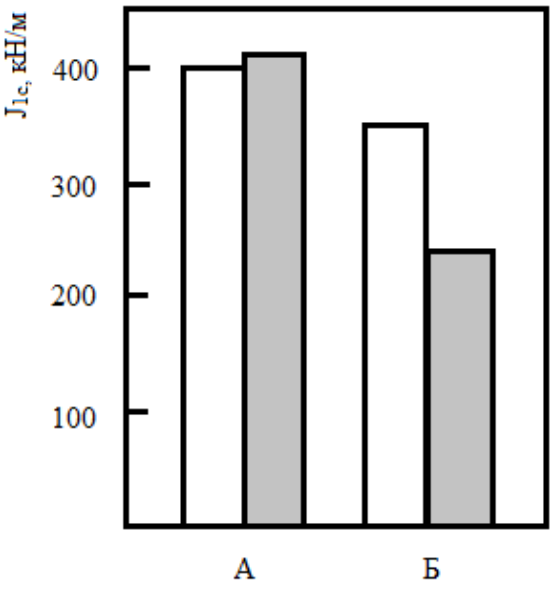


Рисунок 4 – Статична тріщиностійкість J_{1c} МШ (А) і ЗТВ (Б) вихідних (білі) і ремонтних (чорні стовпчики) зразків ЗЗ сталі 17Г1С

Вивчалося також вплив робочого середовища на статичну тріщиностійкість досліджуваних зразків. Таким середовищем слугував модельний розчин водного конденсату (МРВК) [2].

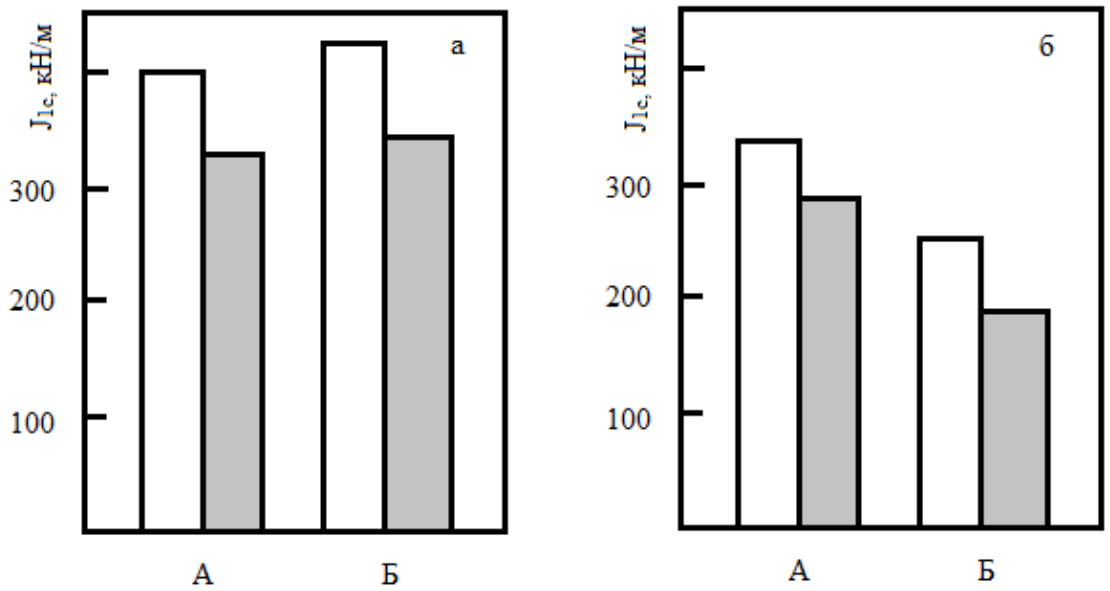
Як видно з даних, наведених на рис. 5, спад параметра J_{1c} для МШ вихідних і ремонтних зразків ЗЗ сталі 17Г1С під впливом МРВК становить біля 20 %. Це досить суттєве пониження статичної тріщиностійкості, і воно пов'язане, на наш погляд, з низькою пластичністю матеріалів зразків (див. табл. 1). Найменший спад статичної тріщиностійкості під дією робочого середовища спостерігався у ЗТВ вихідних зразків ЗЗ (~ 14 %), а найбільший – у цій же зоні ремонтних зразків ЗЗ (близько 24 %). Отже, ЗТВ ремонтних зразків ЗЗ є найбільш чутливою до спаду статичної тріщиностійкості під дією корозійно-активного середовища.

Якщо порівняти випробування на циклічну та статичну тріщиностійкість, за перших спостерігається більш локальність руйнування. Тому вони мають на сьогоднішній день дуже широке застосування [21].

Випробування проведено за умов чистого згину зразків із частотою 1 Гц, навантаження мало синусоїдальну форму циклу з коефіцієнтом асиметрії циклу R = 0,8. Результати досліджень на циклічну тріщиностійкість (ЦТ) наведено у вигляді кінетичних діаграм втомного руйнування (КДВР). Механічним показником стану вихідних і ремонтних зразків ЗЗ сталі 17Г1С слугував пороговий коефіцієнт інтенсивності напружень ΔK_{th}.

Результати випробувань цих зразків на ЦТ наведено на рис. 6.

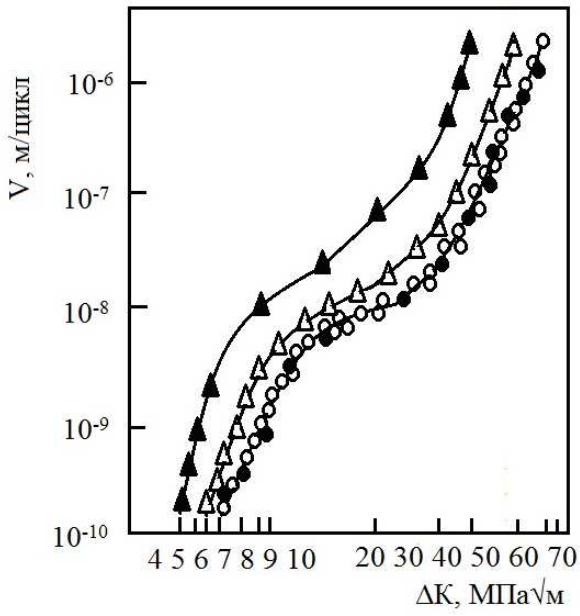
Попередньо визначили значення ΔK_{th} матеріалу труби запасу, яке становило ~ 5 МПа$\sqrt{м}$. Отже, зварювання сприяє його підвищенню. МШ у вихідному стані ΔK_{th} = 6,9 МПа$\sqrt{м}$ (рис. 6) і не залежить від стану зразків, які під-



білі стовпчики – випробування на повітрі; чорні – у МРВК

Рисунок 5 – Статична тріщиностійкість J_{1c} МШ (а) і ЗТВ (б) вихідних (А) і ремонтних (Б) зразків ЗЗ сталі 17Г1С

лягали випробуванням, а отримані для них КДВР повністю ідентичні. З переходом до випробувань вихідних, а потім ремонтних зразків ЗЗ значення ΔK_{th} відповідно зменшується до 6,1 МПа√м і 4,6 МПа√м. Змінюється характер КДВР: суттєво зростає швидкість росту втомної тріщини (ШРВТ) і зменшуються критичні коефіцієнти інтенсивності напружень ΔK_{fc}. Відзначимо, що параметр ΔK_{th} більш чутливий до структурних змін ЗТВ, ніж критична величина ΔK_{fc}.



білі символи – вихідні;
чорні – ремонтні зразки ЗЗ сталі 17Г1С

Рисунок 6 – КДВР для МШ (о, ●) і ЗТВ (▲, Δ)

З метою вивчення впливу робочих корозійно-активних середовищ на ЦТ вихідних і ремонтних зразків ЗЗ сталі 17Г1С провели їх порівняльні випробування на повітрі, у дистильованій воді (pH 6,7) та МРВК (pH 6,5) (рис. 7).

Випробування на ЦТ в різних корозійно-активних середовищах підвищувало ШРВТ порівняно з випробуваннями на повітрі. З підвищенням агресивності середовища (повітря → дистильована вода → МРВК) ЦТ зразків знижувалася. Найбільше зростання ШРВТ спостерігалося за випробувань ремонтних зразків ЗЗ в середовищі МРВК. Порівняно з випробуваннями на повітрі, вона була в 1,3 разів вища. Це свідчить про те, що МТ зазнав спаду загального залишкового ресурсу в 1,3 разів.

Отже, для ЗТВ ремонтних зразків нами встановлена низка нетипових явищ: зниження характеристик $\sigma_в$ і $\sigma_{0,2}$ супроводжується спадом пластичності, ударної в'язкості та тріщиностійкості. Такий характер змін типовий для деградованого металу [7] і пов'язаний зі змінами мікроструктури сталі 17Г1С (рис. 2).

Для оцінки надійності ЗЗ трубопроводів необхідно вивчити їх корозійну стійкість [22, 23]. Стаціонарний потенціал E_{st} визначали відносно хлорид-срібного електрода. За побудованими поляризаційними кривими визначали поляризаційний опір R_p для матеріалу всіх зон ЗЗ. Отримані дані занесені в табл. 2.

З наведених в таблиці даних видно, що поляризаційний опір МШ для зразка у вихідному стані найвищий серед усіх його зон. Тому корозійна стійкість МШ буде набагато вищою, ніж в двох інших зонах – ОМ і ЗТВ.

Проте, слід мати на увазі, що сам поляризаційний опір не здатний однозначно визначати корозійну стійкість зон ЗЗ [1]. За різних електродних потенціалів цих зон корозійна стійкість залежить також від їх взаємної поляризації. У корозійному середовищі різні електродні потенціали утворюють гальванопари. Винятком тут є ОМ. Його площа значно перевищує площі

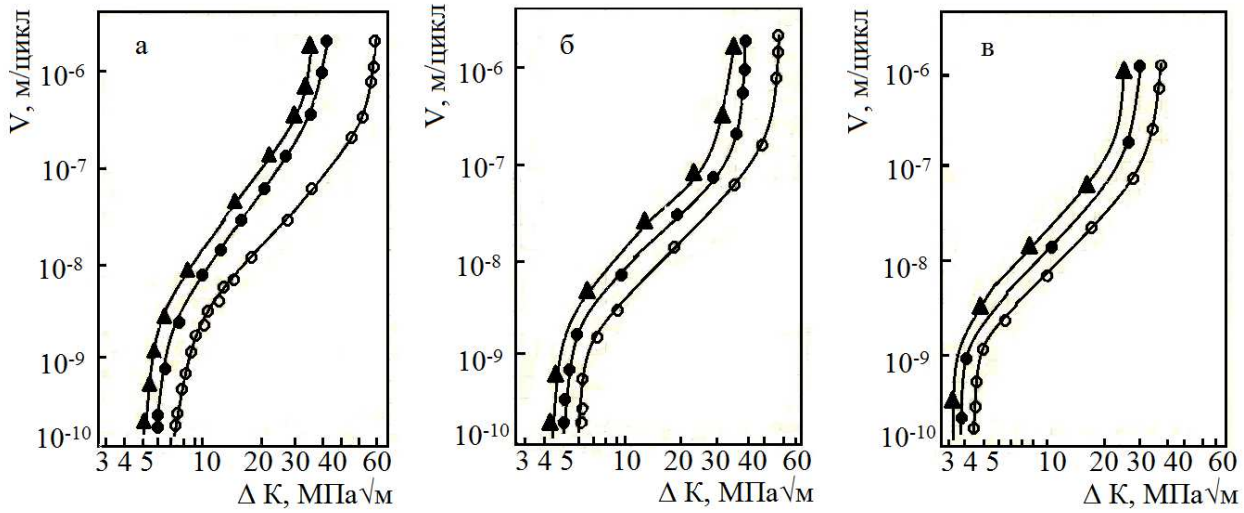


Рисунок 7 – КДВР для МШ (а), ЗТВ вихідних (б) і ремонтних (в) зразків ЗЗ сталі 17Г1С за випробувань на повітрі (о), у дистильованій воді (●) і МРВК (▲)

Таблиця 2 – Поляризаційний опір R_p і стаціонарний потенціал E_{st} вихідного та ремонтного зразків ЗЗ сталі 17Г1С

Зони ЗЗ / Стан зразка ЗЗ	ОМ		ЗТВ		МШ		ЛС
	R_p, Ом·см^2	E_{st}, V	R_p, Ом·см^2	E_{st}, V	R_p, Ом·см^2	E_{st}, V	E_{st}, V
Вихідний	710	- 0,465	766	- 0,470	1048	- 0,445	- 0,435
Ремонтний	513	- 0,480	634	- 0,490	1048	- 0,445	- 0,445

інших зон, завдяки чому він не поляризується. Тому поляризації підлягають МШ і ЗТВ. При цьому не виключено, що окремо розглядувана зона з вищою корозійною стійкістю кородуватиме у гальванічній парі з іншими зонами ЗЗ інтенсивніше.

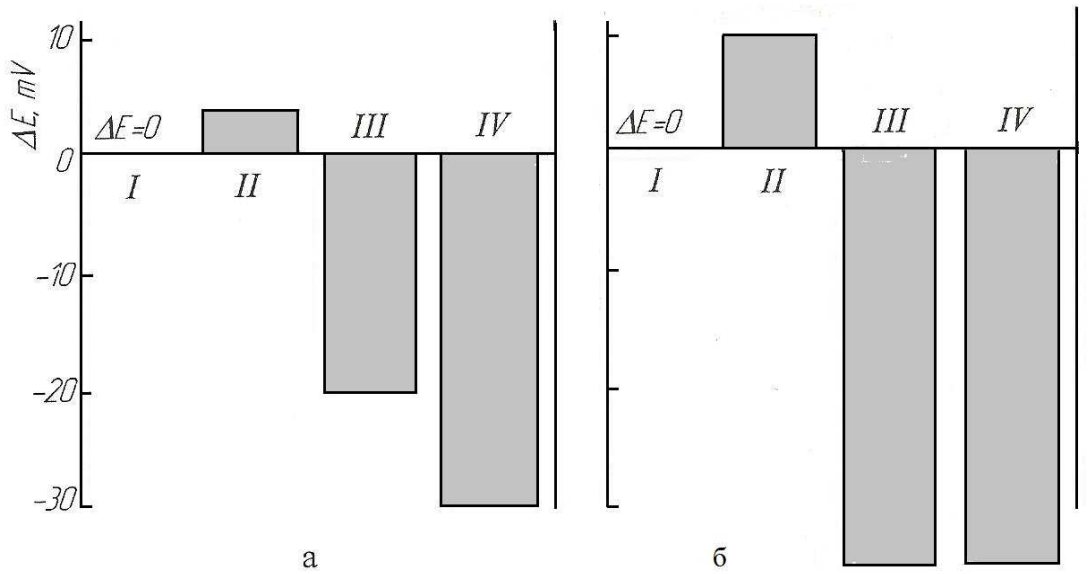
Вимірювання електродних потенціалів проводили також в ще одній зоні, яка розміщена між ЗТВ і МШ. Це так звана лінія сплаву (ЛС) площею до 1 мм^2.

Корозійна стійкість ОМ визначається тільки величиною поляризаційного опору, оскільки він не поляризується (рис. 8). З наведених даних видно, що у вихідних зразках найбільша різниця потенціалів зон ЗЗ становить 0,035 V, а у ремонтних – 0,045V. Тому в другому випадку електрохімічна гетерогенність окремих зон ЗЗ відносно електродних потенціалів є більш суттєвою. Найпозитивніші значення отримано для ЛС обох типів зразків і МШ ремонтних зразків, найвід'ємніші – для зон ЗТВ обох типів зразків. Відповідно у позитивний бік поляризуються ЗТВ обох типів зразків, а у від'ємний бік – зони МШ і ЛС цих же зразків. Анодна поляризація ЗТВ інтенсифікуватиме анодні реакції та гальмуватиме катодні, а катодна поляризація МШ і ЛС, навпаки, пришвидшуватиме на них катодні реакції і гальмуватиме анодні. МШ властивий високий рівень поляризаційного опору. Якщо врахувати ще й позитивний вплив катодної поляризації, то його корозійна стійкість зросте. Незважаючи на те, що поляризаційний опір металу ЗТВ вищий за ОМ, негативний вплив на нього анодної поляризації понизить його корозійну стійкість. Тобто, саме на ЗТВ інтенсифікуватиметься корозія. Збільшення часу експлуатації МТ підвищує небезпеку появи вибіркової корозії ЗТВ.

Відомо, що катодний процес супроводжується виділенням водню [24], а це загрожує наводнюванням металу у катодно поляризованих зонах ЗЗ. Згідно отриманих результатів дослідження слід сподіватися, що найсильніше наводнювання отримає матеріал ЛС. За можливої додаткової вибіркової корозії ЗТВ наводнювання сприяє утворенню корозійних каверн в ділянці ЛС, що призводить, як правило, до воднево окрихчення сталі та зародження мікротріщин. Подальше поширення тріщин від ЛС буде залежати від того, якій із зон МШ чи ЗТВ властивий найнижчий опір крихкому руйнуванню.

Наводнювання суттєво погіршує фізико-механічні та електрохімічні властивості трубних сталей і сприяє їхній деградації. Попередня пластична деформація (ППД) підсилює чутливість трубних сталей до водневої крихкості (ВК). Це пов'язано з тим, що деформація розриває захисні плівки поверхні металу. Оголена сталь отримує можливість більш інтенсивно наводнюватись. Ці питання уже вивчені до певної міри для матеріалів і ЗЗ магістральних НГП [1, 2, 7, 16, 17, 24], однак для зон ремонтних ЗЗ такі дослідження зовсім не проводилися.

Наводнювання зразків проводилось за різної густини струму катодної поляризації в електрохімічній комірці, яка охоплювала їх робочу частину. Використовували водні розчини H_2SO_4 з різною наводнювальною здатністю: pH1 з до-



I – ОМ; II – ЗТВ; III – МШ; IV – ЛС

Рисунок 8 – Поляризація різних зон ЗЗ сталі 17Г1С у вихідних (а) і ремонтних (б) зразках

даванням 2 г/л інгібітора корозії – триполіфосфату та pH0 з додаванням 2 г/л інгібітора корозії та стимулятора наводнювання – тіосечовини. Послідовність наводнювання та навантаження проводили за п'ятьма схемами, розробленими в роботі [25].

Формально визначене відносне видовження зразка виявилось малоінформативним для оцінки ВК, спричиненої множинним розтріскуванням наводнюваного зразка за пластичного деформування. Тому тільки відносне звуження слід вважати найінформативнішим показником схильності ЗЗ до ВК, яку оцінювали за коефіцієнтом $K_\psi = \psi^н / \psi$, де $\psi^н$ і ψ – відносне звуження наводнених і ненаводнених зразків відповідно. Після металографічного аналізу профілів зламу ЗЗ встановлено, що в усіх випадках воно руйнувалося в зоні ОМ.

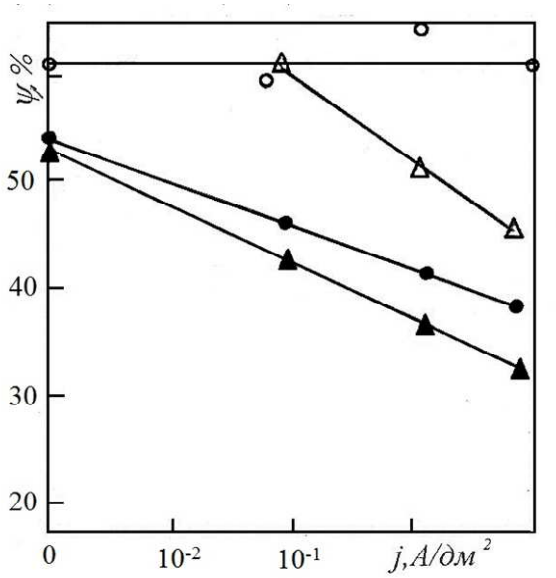
В роботі використані результати виконаних раніше досліджень з наводнювання ЗЗ труб запасу [25 – 27], в яких приймав участь к.т.н. Тараєвський О.С.

Проведена порівняльна оцінка впливу попереднього електролітичного наводнювання (ПЕН) на механічні властивості металу ЗТВ вихідних і ремонтних зразків ЗЗ сталі 17Г1С.

Згідно першої схеми зразки ПЕН протягом одної години і кожні 5 хв. навантажували на повітрі до руйнування.

Вихідні зразки ЗЗ сталі 17Г1С показали повну відсутність чутливості параметра ψ до ПЕН в розчині з pH1. За всіх значень густини струму поляризації коефіцієнт $K_\psi = 1$.

Коли ПЕН виконувалось в агресивнішому середовищі з pH0, то за густини струму поляризації >0,1 А/дм^2 пластичність зазнала помітного спаду і за J = 10А/дм^2 значення K_ψ = 0,74. Зростання густини струму поляризації для ремонтних зразків призводить до постійного спаду показника ψ. У розчині з pH1 K_ψ зменшився до 0,73, а у розчині з pH0 – до 0,6.

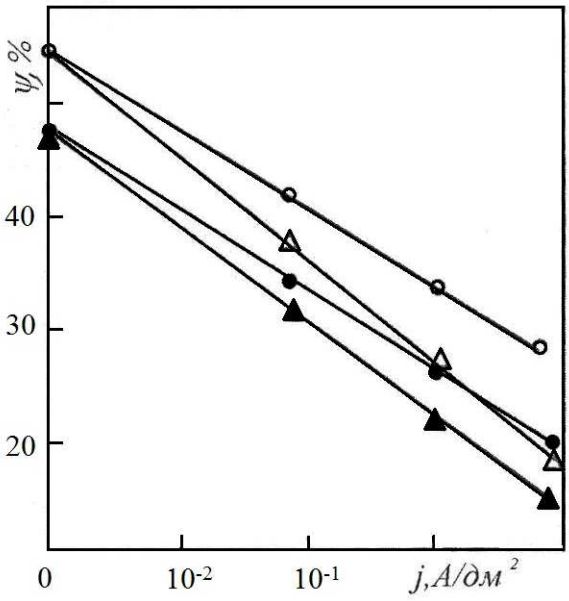


вихідні (білі) та ремонтні (чорні символи) зразки; o, ● – pH 1; Δ, ▲ – pH 0

Рисунок 9 – Вплив ПЕН і pH середовища на ψ ЗЗ сталі 17Г1С

Згідно з другою схемою зразки ПЕН впродовж однієї години, продовжуючи наводнення, піддавали розтягу до руйнування. Додаткове наводнювання під навантаженням як вихідних, так і ремонтних зразків ЗЗ сталі 17Г1С призводить до сильного окрихчення матеріалу (рис. 10).

Окрихчення металу ремонтних зразків проявило себе більш інтенсивно, ніж окрихчення металу вихідних зразків. Так, для розчинів з pH1 і pH0 за густини поляризації 10 А/дм^2 для вихідних зразків значення K_ψ становили 0,54 і 0,37. За таких же умов для ремонтних зразків величини K_ψ становили відповідно 0,42 і 0,26.



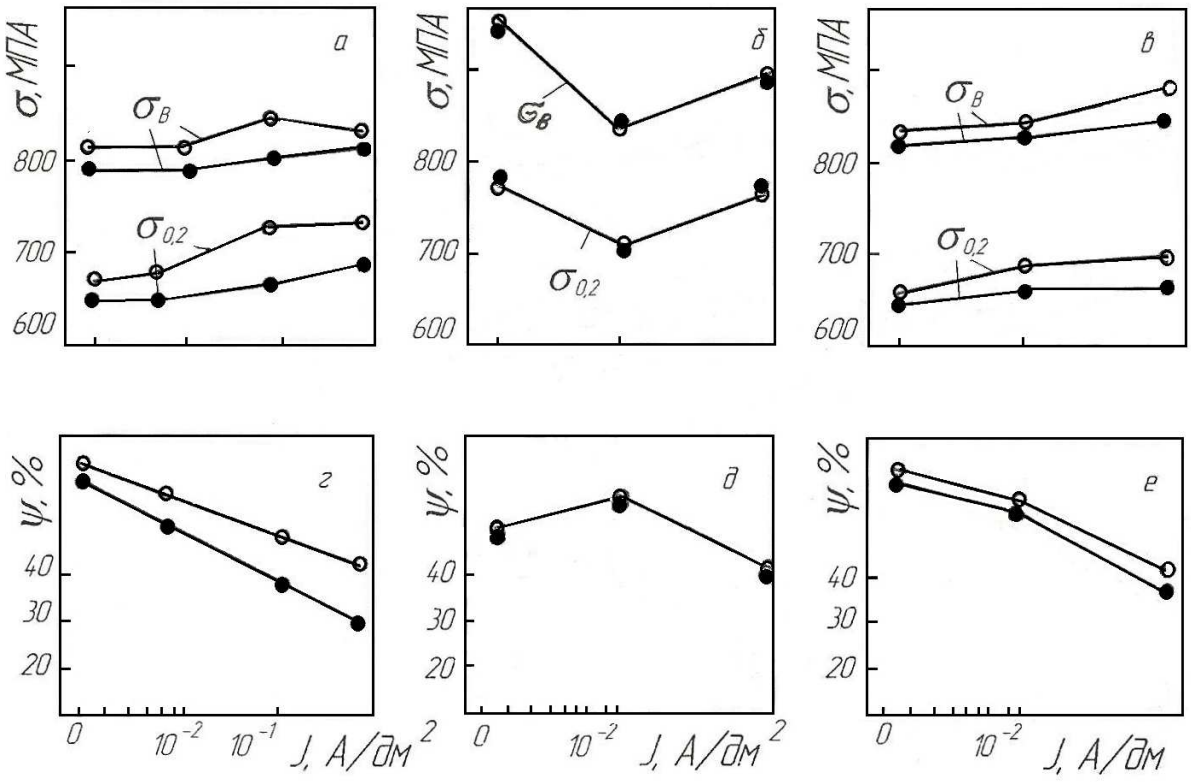
вихідні (білі) та ремонтні (чорні символи) зразки; о, ● – pH 1; Δ, ▲ – pH 0

Рисунок 10 – Вплив наводнювання під час навантаження і pH середовища на ψ ЗЗ сталі 17Г1С

З наведених вище результатів досліджень видно, що короткочасна поляризація за активного навантаження зразків дає набагато яскравіший ефект, ніж одногодинне ПЕН. Це переконливо свідчить про різні механізми абсорбування водню навантаженим і ненавантаженим металом. Під час навантаження відбувається руйнування поверхневих захисних плівок на сталі, і оголений метал інтенсивніше абсорбує водень. Розчинність водню в розтягненій сталі зростає. Якщо ж сталь – пластично деформована, то одночасно з дифузійним діє й дислокаційне перенесення водню. Деформована поверхня сприяє утворенню нових центрів абсорбації, що полегшує проникнення водню в метал.

Друга схема наводнення та навантаження застосовувалась і під час випробувань розтягом зразків із виточкою. Виточка є концентратором напружень, що утруднює пластичну деформацію. Тому показники міцності ЗЗ для зразків з виточкою були вищі, ніж для гладких. Вони наведені для нетто площі (рис. 11), тож можуть застосовуватися тільки для порівняльних оцінок різних зон ЗЗ.

З рис. 11 а, г видно, що механічні характеристики ($\sigma_в$, $\sigma_{0,2}$ і ψ) ОМ ремонтних зразків нижчі за відповідні показники вихідних зразків. Цього і слід було сподіватися. Адже ОМ вихідних зразків – це неексплуатована трубна сталь 17Г1С, а ремонтних зразків – ця ж сталь після 31 року експлуатації. За наводнювання під час навантаження характеристики міцності $\sigma_в$, $\sigma_{0,2}$ з ростом густини струму повільно зростають, а зі збільшенням пластичності – зменшуються. Оскільки $К_ψ$ для вихідних зразків становило 0,68, а для ремонтних – 0,51, то останні мають вищу чутливість до крихкого руйнування під дією водню.



а, г – ОМ; б, д – ЗШ; в, е – ЗТВ

Рисунок 11 – Вплив наводнювання під час навантаження на характеристики міцності (а-в) та пластичності (г-е) різних зон ЗЗ вихідних (о) та ремонтних (●) зразків з виточками сталі 17Г1С

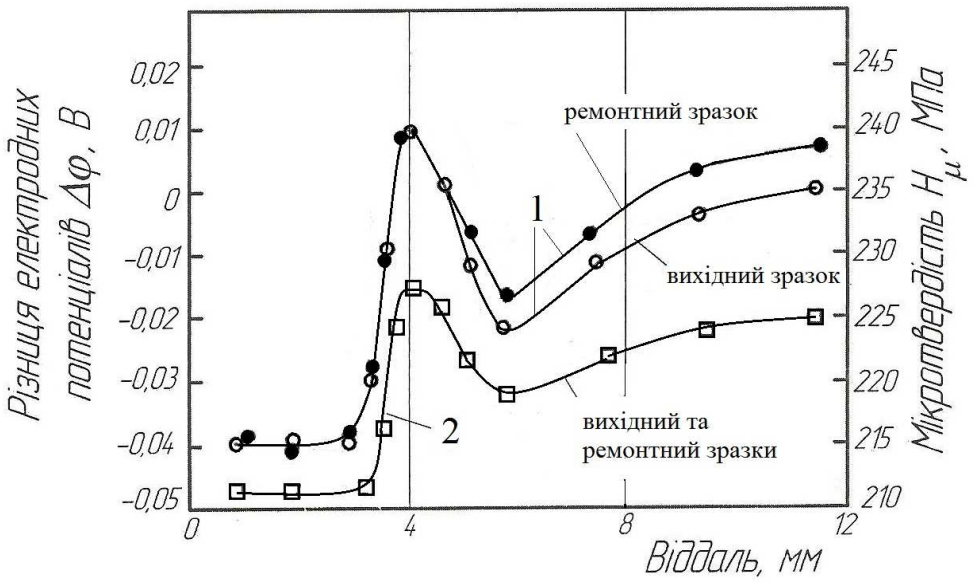


Рисунок 12 – Розподіл різниці електродних потенціалів (1) і мікротвердості (2) для металу вихідного та ремонтного зразків ЗЗ сталі 17Г1С

Ненаводнений метал ЗШ (рис. 11 б, д) мав найвищі показники міцності ($\sigma_в$, $\sigma_{0,2}$) і найнижчий показник пластичності ψ серед усіх зон ЗЗ. Всі ці параметри як для вихідних зразків, так і ремонтних майже не відрізнялися.

Наводнювання за густини струму 0,01 А/дм^2 сприяє пластифікації МШ: показники міцності $\sigma_в$ і $\sigma_{0,2}$ спадають, а пластичність ψ – зростає. Підвищення густини струму призводить до зворотньої тенденції – зростання величини $\sigma_в$ і $\sigma_{0,2}$ і спаду ψ. Тобто, пластифікація МШ переходить до його окрихчення.

Ненаводнений матеріал ЗТВ має практично однакові значення характеристик міцності $\sigma_в$ і $\sigma_{0,2}$ та пластичності ψ з ОМ (рис. 11). Аналогічними були також тенденції до їх змін за наводнювання під навантаженням.

Аналіз результатів досліджень свідчить, що найчутливішими до окрихчення металу абсорбованим воднем є ОМ і ЗТВ (рис. 11 г і е). Однак, якщо в першому випадку для ремонтних зразків K_ψ становило 0,51, то в другому – 0,67. Тобто ЗТВ ремонтних зразків менш чутлива до крихкого руйнування під дією водню, ніж зона ОМ. Це ж стосується ЗТВ вихідних зразків, оскільки для них K_ψ = 0,64.

Суть третьої схеми наводнювання та навантаження полягає ось у чому. Зразок навантажували на повітрі до певного рівня пружної чи пластичної деформації, ПЕН одну годину за такого рівня навантаження з подальшим руйнуванням на повітрі.

Зразки з виточкою наводнювали 1 год. під навантаженням за пружних деформацій (σ = 200 і 400 МПа) та після пластичної деформації (480 МПа). Проведення ПЕН зразків, навантажених в області пружних деформацій, знижує пластичність металу при його руйнуванні. З підвищенням напружень ця тенденція відчутніша. Для вихідних зразків отримали K_ψ = 0,87 і 0,78 відповідно при 200 і 400 МПа, а для ремонтних зразків ці показники були 0,85 і 0,76.

Під час транспортування труб, монтажу трубопроводів, зсувів грунтів тощо в МТ можуть виникати напруження вищі границі плинності (в нашому випадку σ = 480 МПа). Наводнювання зразків у таких умовах підсилює ВК металу ЗЗ. Так, для вихідних зразків отримали ψ_ψ = 0,61, а для ремонтних – 0,57.

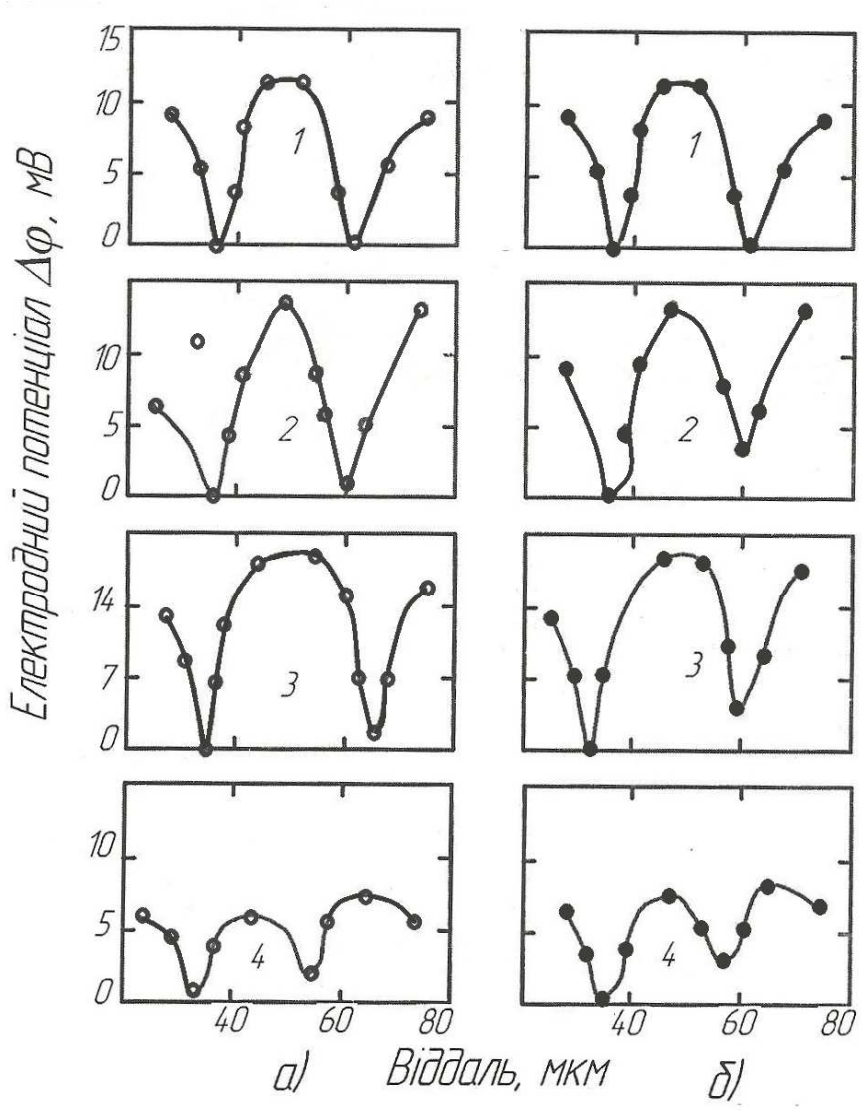
Згідно з четвертою схемою наводнювання та навантаження зразок навантажується на повітрі до певної пластичної деформації, розвантажується, наводнюється і доводиться до руйнування на повітрі. Навантаження на повітрі проводилось до напружень 480 і 520 МПа. За більш інтенсивного навантаження ефект ВК проявляється сильніше. Для вихідних зразків отримали K_ψ = 0,73 і 0,57, а для ремонтних K_ψ = 0,67 і 0,49 відповідно.

Випробування за п'ятою схемою наводнювання та навантаження відбувалося спочатку за четвертою схемою, однак повторне навантаження зразка до руйнування проводилось не припиняючи наводнювання. П'ята схема випробувань проявила себе найчутливішою до ВК зразків ЗЗ сталі 17Г1С. Найінтенсивніше окрихчення отримали за напружень 520 МПа. Для вихідних зразків K_ψ становило 0,30, а для ремонтних K_ψ = 0,23.

Отже, за використання всіх п'яти схем навантаження та наводнювання матеріал ЗТВ ремонтних зразків ЗЗ сталі 17Г1С проявив себе більш чутливим до ВК порівняно з матеріалом ЗТВ вихідних зразків.

Під час оцінки якості ЗЗ слід приділяти належну увагу визначенню електрохімічної гетерогенності їх поверхні, за якою легко судити про схильність ЗЗ до корозійного руйнування.

Розподіл мікротвердості та різниці електродних потенціалів для металу вихідних і ремонтних зразків ЗЗ сталі 17Г1С проілюстрований на рис. 12. Найбільша електрохімічна неоднорідність обох типів зразків становить приблизно 50 мВ, а зміни показника $\Delta\varphi$ в межах



а - вихідний зразок; б - ремонтний зразок
1 - МШ; 2 - ЛС; 3 - ЗТВ; 4 - ОМ

Рисунок 13 – Розподіл мікроелектродних потенціалів у різних зонах ЗЗ

МШ ідентичні. В сторону від МШ до ОМ, тобто в ЗТВ, характеристика Δφ для ремонтного зразка зсунута вверх по відношенню до вихідного зразка. Це свідчить про окрихчення матеріалу та підвищення його схильності до корозійного руйнування.

Мікротвердість і електродні потенціали різних зон ЗЗ залежать від структурно-хімічної неоднорідності металу і мають такий же аналогічний характер розподілу. Однак мікротвердості всіх зон ЗЗ мають однакові значення, тому за ними не можна прогнозувати поведінку трубних сталей у ході подальшої експлуатації.

Всім зонам ЗЗ властива мікроелектрохімічна неоднорідність. Розподіл у них мікроелектродних потенціалів наведений на рис. 13 ЗТВ і ЛС володіли найбільшою мікроелектрохімічною гетерогенністю, а ОМ – найменшою.

В подальшому планується вивчити вплив попереднього пластичного деформування та наводнювання на статичну і циклічну тріщиностійкість ЗЗ трубопроводів.

Висновки

1. Відповідальними за руйнування зварних з'єднань є дефекти наводнюваних ділянок, звідки починаються корозійні процеси.

2. Аналіз конструкції зварних з'єднань нафтогазопроводів вказав на доцільність використання у дослідженнях зразків двох типів: 1 – вихідних зразків (зварне з'єднання двох неексплуатованих труб), 2 – ремонтних зразків (зварне з'єднання катушки труби запасу з експлуатованою трубою).

3. Структури МШ обох типів зразків не виявили ніякої різниці між собою. Проте в сусідній ЗТВ мікроструктура стовпчастих кристалітів, властива цьому матеріалу, для ремонтних зразків була більш крупнозернистою порівняно із вихідними зразками.

4. Виявлено аномалію у механічній поведінці матеріалу ЗТВ ремонтних зразків, яка властива деградованим сталям. Вона проявляється в зниженні твердості НВ, параметрів міцності $\sigma_в$ і

$\sigma_{0,2}$ за одночасного зменшення відносного звуження ψ, ударної в'язкості KCV та статичної тріщиностійкості J_{1c}. ЗТВ ремонтних зразків ЗЗ є найбільш чутливою до спаду J_{1c} під дією робочого середовища (модельного розчину водного концентрату). Встановлено, що МШ у вихідному стані має K_{th} = 6, 9 МПа√м. З переходом до випробувань вихідних, а потім ремонтних зразків ЗЗ значення ΔK_{th} відповідно зменшується до 6,1 МПа√м і 4,6 МПа√м. Змінюється характер КДВР: суттєво зростає швидкість росту втомної тріщини і зменшуються значення ΔK_{fc}. З підвищенням агресивності середовища циклічна тріщиностійкість зразків знижувалася. Найбільше зростання швидкості росту втомної тріщини спостерігалося під час випробувань ремонтних зразків в агресивних середовищах. В той час, як механічні характеристики МШ обох типів зразків не відрізнялися, метал ЗТВ ремонтних зразків окрихчувався найінтенсивніше.

5. Визначенням поляризаційного опору, стаціонарного потенціалу та вивченням взаємної поляризації різних зон ЗЗ сталі 17Г1С встановлено, що саме на ЗТВ ремонтного зразка найбільше інтенсифікуватиметься корозія. Збільшення часу експлуатації МТ підвищує небезпеку появи тут додаткової вибіркової корозії.

6. За використання різних схем навантаження та наводнювання дослідних зразків встановлено, що матеріал ЗТВ ремонтних зразків ЗЗ сталі 17Г1С проявив себе більш чутливим до водневого окрихчення порівняно з матеріалом ЗТВ вихідних зразків.

7. Вивченням електрохімічної гетерогенності поверхні ЗЗ показано підвищене окрихчення матеріалу ЗТВ ремонтних зразків та зростання його схильності до корозійного руйнування.

Література

1 Крижанівський Є.І. Корозійно-воднева деградація нафтових і газових трубопроводів та їх запобігання: науково-технічний посібник у 3-х т.: Основи оцінювання деградації трубопроводів / Є.І. Крижанівський, Г.М. Никифорчин. – Івано-Франківськ: Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, 2011. – 445 с.

2 Механіка руйнування та міцність матеріалів: Довідн. посібник / Під заг. ред. В.В. Панасюка. – Львів: Спалом, 2009. – 504 с. Т.11: Міцність і довговічність нафтогазових трубопроводів і резервуарів / Г.М. Никифорчин, С.Г. Поляков, В.А. Черватюк [та ін.] / Під ред. Г.М. Никифорчина.

3 Кузьменко Ю. Сучасні вимоги до надійності та безпеки магістральних трубопроводів / Ю. Кузьменко // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2004. – Спецвипуск № 4. – Т. 1. – С.373 – 375.

4 Банахевич Ю.В. Діагностування напруженого стану магістральних нафтогазопроводів в околі стикових зварних з'єднань та корозійних пошкоджень розрахунково-експериментальним методом: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.15.13 "Нафтогазопроводи, бази та сховища" / Ю.В. Банахевич. – Івано-Франківськ, 2003. – 19 с.

5 Драгіляєв А.В. Визначення залишкових напружень і оцінка їх впливу на довговічність трубопроводів в зоні кільцевих зварних з'єднань: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.15.13 "Нафтогазопроводи, бази та сховища" / А.В. Драгіляєв. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2006. – 18 с.

6 Іванчук О.О. Діагностування напруженого стану і оцінка запасу міцності кільцевих зварних з'єднань стиків різнотовщинних труб магістральних нафтогазопроводів: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.05.13 "Трубопровідний транспорт, нафтогазосховища" / О.О. Іванчук. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2008. – 20 с.

7 Петрина Д.Ю. Вплив експлуатаційної деградації матеріалів і зварних з'єднань магістральних нафтогазопроводів на їх працездатність: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра техн. наук: спец. 05.05.13 "Трубопровідний транспорт, нафтогазосховища" / Д.Ю. Петрина. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2011. – 36 с.

8 Мазур И.И. Безопасность трубопроводных систем / И.И. Мазур, О.М. Иванцов. – М.: Центр ЕЛИМА, 2004. – 1096 с.

9 Вышемирский Е.М. Состояние и основные направления развития сварочного производства ОАО "Газпром" // Сварка и диагностика. – 2009. – № 1. – С.16-19.

10 Сварочно-монтажные работы в трубопроводном строительстве [Тенст]: учебное пособие для вузов / А.Ф. Суворов, Г.Г. Васильев, Ю.А. Горянков [и др.]. – М.: ЗАО Звезда", 2006. – 240 с.

11 Галкин В.А. Опыт розработки современных отечественных технологий и оборудования для механизированной сварки магистральных газопроводов / В.А. Галкин, А.Л. Латишев, Д.Г. Будревич // Сварка и диагностика. – 2011. – № 2. – С.37-43.

12 Гецник О.Б. Воспроизводимость качества сварных соединений при автоматической орбитальной сварке с управляемым каплепереносом электродного метала / О.Б. Гецник, Б.Л. Гецник, С.И. Полосков // Сварка и диагностика. – 2009. – № 2. – С. 47-53.

13 Хоменко В.И. Новая высокопроизводительная технология комбинированной сварки магистральных трубопроводов большого диаметра / В.И. Хоменко, А.Я. Сударнин, С.И. Кучук-Яценко // Мир сварки. – 2010. – № 4. – С. 32-37.

14 Шелягин В.Д. Перспективы применения лазерной и гибридной технологий сварки сталей для повышения эксплуатационного ресурса трубопроводов / В.Д. Шелягин, Ю.Ю. Хаскин, А.Б. Бернацкий // Автоматическая сварка. – 2010. – № 10. – С. 37-40.

15 Панчук В.М. Сучасні технології зварювання магістральних нафтогазопроводів / М.В. Панчук, Л.С. Шлапак, О.М. Матвієнків, О.Л. Козак // Науковий вісник ІФНТУНГ. – 2011. – № 3 (29). – С. 24-29.

16 Цирульник О.Т. Деградація властивостей металу зварного з'єднання експлуатованого магістрального газопроводу / О.Т. Цирульник, В.А. Волошин, Д.Ю. Петрина [та інші] // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2010. – № 5. – С. 55-59.

17 Петрина Д.Ю. Оцінювання деградації зварних з'єднань сталі 17Г1С магістрального трубопроводу / Д.Ю. Петрина // Науковий вісник ІФНТУНГ. – 2010. – № 3 (25). – С. 76-85.

18 Механика разрушения и прочность материалов: Справ. пособие в 4 т. / Под общ. ред. Панасюка В.В. / С.Е. Ковчин, Е.М. Морозов. – К.: Наукова думка, 1998. – 436 с.

19 Відомчі будівельні норми України : ВБН В. 2.3-00018201.04 – трубопроводів з дефектами. – К.: Держнафтогазпром, 2000. – 57 с. - т. 3: Характеристики кратковременной трещиностойкости материалов и методы их определения.

20 ДСТУ – НБВ. 2.3.21: 2008. Настанова визначення залишкової міцності магістральних трубопроводів з дефектами. – К.: Мінрегіонбуд України, 2008. – 68 с.

21 Механика разрушения и прочность материалов : Справ. пособие в 4 т. / О.Н. Романив, С.Я. Ярема, Г.Н. Никифорчин [и др.]; под общ. ред. Панасюка В.В.– К.: Наукова думка, 1990. – 680 с. – т. 4: Усталость и циклическая трещиностойкость конструкционных материалов.

22 Detecting Internal Corrosion of Natural Gas Transmission Pipelines : Field Tests of Probes and Systems for Real-time Corrosion Measurement / B.S. Covino, Jr.S.J. Bullard, S.D. Cramer // Proc/ of 16th Intern. Corrrosion Conference, Beijing, China, Sept. 19-24, 2005. – P. 4-17.

23 Lunarska E. Monitorowanie zagrozenia korozja I nawodorowaniem instalacji przemyslowych / E. Lunarska, K. Nikiforow, J. Pyrza // Ochrona przed korozja. – 2001. - № 12. – S. 315-322.

24 Effect of the long-term service og the gas pipeline on the properties og the territe – pearlite steel / H. Nykyforchyn, E. Lunarska, O. Tsyrylnyk, [et al.] // Materials and corrosion. – 2009. - № 9. – P. 716-725.

25 Чутливість водневої крихкості зварного з'єднання сталі 17Г1С магістрального газопроводу / О.Т. Цирульник, Є.І. Крижанівський, Д.Ю. Петрина [та ін.] // Фіз.-хім. механіка металів. – 2004. – № 6. – С. 111-114.

26 Крижанівський Є.І. Вплив наводнення на корозійно-механічні властивості зварних швів газопроводів / Є.І. Крижанівський, О.С. Тараєвський, Д.Ю. Петрина // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2005. – № 1 (14). – С. 29-34.

27 Петрина Д.Ю. Схильність зварного з'єднання магістрального газопроводу до водневої крихкості / Д.Ю. Петрина, О.С. Тараєвський, Д.С. Вуйцік : Матеріали ІІІ Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих учених та спеціалістів ["Зварювання та сучасні технології"], Київ, 25-27 травня 2005 р. – К.: Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, 2005. – С. 110.

Стаття надійшла до редакційної колегії 23.01.13
Рекомендована до друку професором ***Грудзом В.Я.*** *(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ) професором* ***Гевком Б.М.*** *(Тернопільський державний університет імені І. Пулюя)*

УДК 621. 891

ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНА ПОЛЯРИЗАЦІЯ ПОВЕРХОНЬ ФРИКЦІЙНИХ НАКЛАДОК ГАЛЬМІВНИХ ПРИСТРОЇВ

С. І. Криштопа

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, Карпатська, 15,
e-mail: r e t e s @ m a i l . r u

Наведено результати дослідження перспективного методу зменшення зносу фрикційних накладок гальмівних пристроїв, у тому числі лебідок бурових установок, шляхом термоелектричної поляризації поверхонь фрикційних накладок гальм. Проаналізовані стадії термоелектричної поляризації поверхонь фрикційних накладок гальмівних пристроїв на прикладі металополімерних пар тертя гальм в стендових умовах за допомогою змішаних процесів «нагрівання – охолодження» при зміні полярності електричного струму, що забезпечує роботу термобатарей в режимі термоелектрогенератора і термоелектрохолодильника. Запропоновано конструкцію гальма з термоелектричною поляризацією поверхонь фрикційних накладок барабанно-колодкового гальма в стендових умовах за рахунок процесів нагрівання та охолодження, які реалізовуються за допомогою термобатарей, що працюють у режимах термоелектрогенератора і термоелектрохолодильника, а також зовнішніх електричних полів, що діють на поверхні поляризованих накладок. При цьому досягаються: можливість зміни напряму струму в зовнішньому електричному ланцюзі для термоелектричної поляризації ділянок поверхонь сектора накладок колодок; можливість роботи термобатарей, вмонтованих в сектори фрикційних накладок гальмівних колодок в режимі термоелектрогенератора і термоелектрохолодильника; використання змінного темпу нагрівання ділянок поверхонь секторів накладок колодок за допомогою термобатарей; можливість на всіх стадіях термоелектричної поляризації ділянок поверхонь сектора накладок колодок управляти енергонавантаженістю фрикційних накладок гальмівних механізмів.

Ключові слова: термоелектрична поляризація, термобатареї, фрикційні накладки, гальмівні механізми.

Приведены исследования перспективного метода уменьшения износа фрикционных накладок тормозных устройств, в том числе лебедок буровых установок, за счет термоэлектрической поляризации поверхностей фрикционных накладок тормозов. Проанализированы стадии термоэлектрической поляризации поверхностей фрикционных накладок тормозных устройств на примере металлополимерных пар трения тормозов в стендовых условиях с помощью смешанных процессов «нагревания – охлаждение» при изменении полярности электрического тока, что обеспечивает работу термобатарей в режиме термоэлектрогенератора и термоэлектрохолодильника. Предложена конструкция тормоза с термоэлектрической поляризацией поверхностей фрикционных накладок барабанно-колодочного тормоза в стендовых условиях за счет процессов нагревания и охлаждения, которые реализовываются с помощью термобатарей, которые работают в режимах термоэлектрогенератора и термоэлектрохолодильника, а также внешних электрических полей, действующих на поверхности поляризуемых накладок. При этом достигаются: возможность изменения напрямую тока во внешней электрической цепи для термоэлектрической поляризации участков поверхностей секторов накладок колодок; возможность работы термобатарей, вмонтированных в сектора фрикционных накладок тормозных колодок, в режиме термоэлектрогенератора и термоэлектрохолодильника; использование переменного темпа нагревания участков поверхностей секторов накладок колодок с помощью термобатарей; возможность на всех стадиях термоэлектрической поляризации участков поверхностей сектора накладок колодок управлять их энергонагруженностью фрикционных накладок тормозных механизмов.

Ключевые слова: термоэлектрическая поляризация, термобатареи, фрикционные накладки, тормозные механизмы.

Results of reducing the wear in friction protective straps of brake devices, including drilling hoists are resulted in this paper, due to thermo-electric polarization of surfaces of friction protective straps of brakes. The analyzed stages of thermo-electric polarization of surfaces of friction protective straps of brake devices are analyzed on the example of metal-polymer pairs of brakes friction in stand terms with the help of the mixed processes of «heating – cooling» at the change of polarity of electric current, that provides work of thermopiles in the mode of thermal-electric-generator and thermal-electric-refrigerator. The construction of brake with thermo-electric polarization of surfaces of friction protective straps of drum-block brake in stand terms due to the processes of heating and cooling are offered. They are realized by thermopiles, which work in the modes of thermal-electric-generator and thermal-electric-refrigerator, and also external electric fields operating on the surface of the polarized protective straps is offered in this paper. Thus possibility of change straight of current in an external electric chain for thermo-electric polarization of areas of surfaces of sectors of protective friction straps; possibility of work of the thermopiles mounted in the sectors of friction protective straps of skids, in the mode of thermal-electric-generator and thermal-electric-refrigerator; use of variable rate of heating areas of friction straps sectors surfaces by thermopiles; possibility at all stages of thermo-electric polarization of areas of surfaces of sector of friction straps to handle their energy loading of friction straps of brake mechanisms.

Keywords: thermo-electric polarization, thermopiles, friction straps, brake mechanisms.

Вступ. Інтенсивний розвиток нанотрибології в металополімерних парах тертя гальмівних пристроїв вимагає розробки нових методів розрахунку енергетичних рівнів їх робочих елементів. Останні визначаються складовими електричних струмів (електризації ковзання і контакту; руху полімерних і металевих заряджених частинок фрикційного масопереносу, що виникають за рахунок сорбційно-десорбційних процесів у приповерхневих шарах контакту пар тертя гальма; термічних і зворотних розрядів і їх напрямів. Струми, що генеруються на поверхнях пар тертя гальмівних пристроїв, викликають акумулювання теплоти як в їх приповерхневих шарах, так і в тілі неметалевого і металевого фрикційних елементів. При цьому у фізико-хімічних процесах, що відбуваються на поверхнях металополімерних пар тертя гальмівних пристроїв, відіграє роль термоелектрична поляризація поверхонь їх фрикційних накладок.

Стан проблеми і мета роботи. З джерел [1-4] відомо, що вимірювання температурностимулюючих електричних струмів, наведених стаціонарними електричними полями, є одним з методів визначення локальних енергетичних рівнів, що широко використовуються в твердих тілах. Загальна експериментальна процедура цього методу включає чотири стадії: перша – прикладання до зразка постійного електричного поля за початкової температури; друга – охолоджування зразка під дією цього поля до деякої низької температури; третя – зміна величини поля до іншого значення за тієї ж температури; четверта – нагрівання з постійною швидкістю в поле і запис електричного струму, що виникає у вигляді функції температури.

Даний метод застосовується тільки для зразків, виготовлених з фрикційного матеріалу, що мають незначну площу і вагу в порівнянні з фрикційними накладками гальмівних колодок гальм бурових лебідок та автотракторних засобів.

Відомі методи визначення складових електричних струмів [5] і їх напрямів [6] в парах тертя «полімер – метал» барабанно-колодкових гальм при їх нагріванні в стендових умовах. Проте в даних методах не враховуються поляризаційна і деполяризація складові фрикційних накладок в процесі нагрівання і охолоджування їх поверхонь.

Відомий термокомпресор, що містить корпус з газорозподільними клапанами, в якому розміщена термоелектрична батарея, виконана у вигляді порожнистого циліндра, що працює в режимі періодичної зміни електричного струму [7].

Проте, основним недоліком даного технічного рішення є те, що термоелектричні батареї не працюють в режимі термоелектрогенератора і термоелектрохолодильника.

Мета роботи – оцінка термоелектричної поляризації поверхонь фрикційних накладок барабанно-колодкового гальма в стендових умовах завдяки реалізації змішаних процесів («нагрівання – охолоджування»), що включають поляризацію поверхонь ділянок фрикційних накладок при їх охолоджуванні і дію поляризованого зовнішнього електричного поля за рахунок квазіпостійного темпу нагрівання за допомогою термобатарей, що працюють в режимах термоелектрогенератора і термоелектрохолодильника.

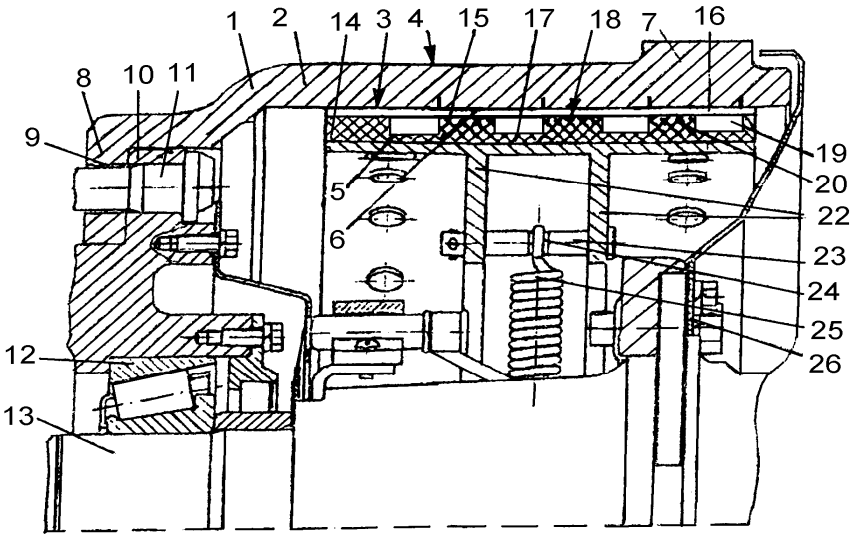
Конструкція і робота барабанно-колодкового гальма з пристроями термоелектричної поляризації поверхонь фрикційних накладок гальмівних колодок. На рис. 1 зображено фрагмент барабанно-колодкового гальма з термоелектричною поляризацією поверхонь фрикційних накладок в стендових умовах. Барабанно-колодкове гальмо містить гальмівний барабан 1, обід 2 з внутрішньою (робочою) 3 і зовнішньою 4 поверхнями. Внутрішня поверхня 3 обода 2 за допомогою циліндричних канавок 5 вздовж його периметру розділена на однакові диски 6. На зовнішній поверхні 4 обода 2 з боку його вільного краю виконано прилив у вигляді підсилюючого кільця 7. З протилежного боку обід 2 барабана 1 зв'язаний з фланцем 8, в якому виконані отвори 9. За допомогою останніх гальмівний барабан 1 прикріплений до фланця маточини 10 болтами 11. У свою чергу, фланець маточини 10 знизу через роликовий підшипник 12 спирається на піввісь 13 заднього моста.

Усередині гальмівного барабана 1 встановлено гальмівні колодки 14, до основи 15 яких за допомогою заклепок 16 прикріплені фрикційні накладки 17 з робочою поверхнею 18. По всьому периметру накладок 17 виконано канавки 19, що розділяють їх робочі поверхні 18 на окремі сектори 20. Наявність в ободі 2 барабана 1 чотирьох незалежних дисків 6 і секторів 20 фрикційних накладок 17 колодок 14 гальма дає змогу моделювати на їх макроділянках наступні види контактів: «полімер – ювенільна поверхня металу»; «полімер – метал з перенесеною плівкою полімеру»; «полімер з перенесеною плівкою металу – метал»; «приповерхневий шар полімеру, що знаходиться в різному термодинамічному стані – метал».

З неробочої сторони основи 15 колодки 14 розміщені їх ребра жорсткості 22, які між собою сполучені пальцем 23 з проточкою 24. В останню посаджена відтяжна циліндрова пружина 25. З вільного краю обода 2 гальмівного барабану 1 встановлено направляючий диск 26, до якого кріпляться гальмівні колодки 14.

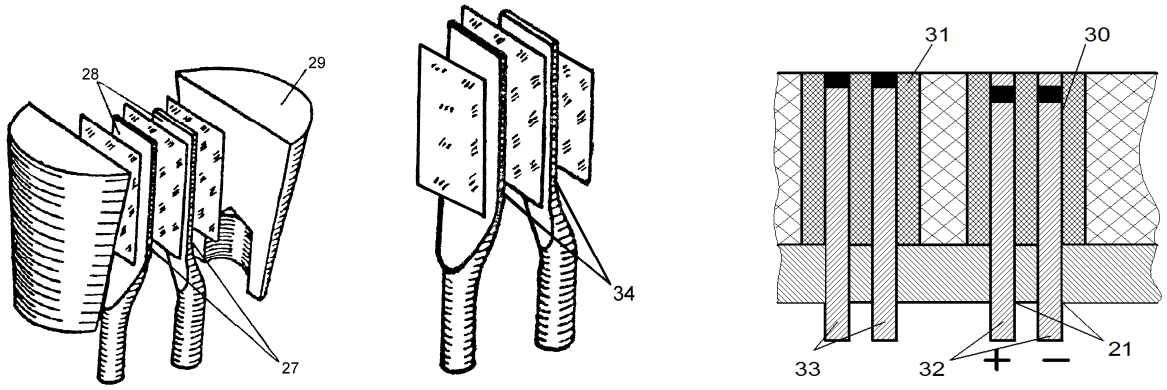
На рис. 2 зображено загальний вид пластинчастої термопари в запобіжному корпусі (а) і без нього (б), а також схема встановлення термопар в основу колодки і накладку (в).

У сектори 20 фрикційних накладок 17 колодок 14 вмонтовуються пластинчасті термопари, кожна з яких має термоелектроди 27, виготовлені з хромеля (+) і копеля (–), між якими розташований шар ізоляції 28. Кожна з термопар першої групи розміщена в корпусі 29. Встановлюються пластинчасті термопари в отвори 30 у фрикційних накладках 17, які ма-



1, 2, 3, 4 – гальмівний барабан з ободом, внутрішньою і зовнішньою поверхнями; 5, 6 – канавки і диски на внутрішній поверхні обода; 7, 8, 9 – підсилююче кільце обода, фланець барабана і отвори в ньому; 10 – фланець маточини; 11 – кріпильні болти; 12 – роликовий підшипник; 13 – піввісь заднього моста; 14, 15, 22 – гальмівні колодки з основами та ребрами жорсткості; 16 – заклепки; 17, 18, 19, 20 – фрикційні накладки з робочими поверхнями, канавками і секторами; 23, 24 – палець з проточкою; 25 – циліндричні пружини; 26 – напрямний диск

Рисунок 1 – Фрагмент барабанно-колодкового гальма з термоелектричною поляризацією поверхонь фрикційних накладок



а) б) в)

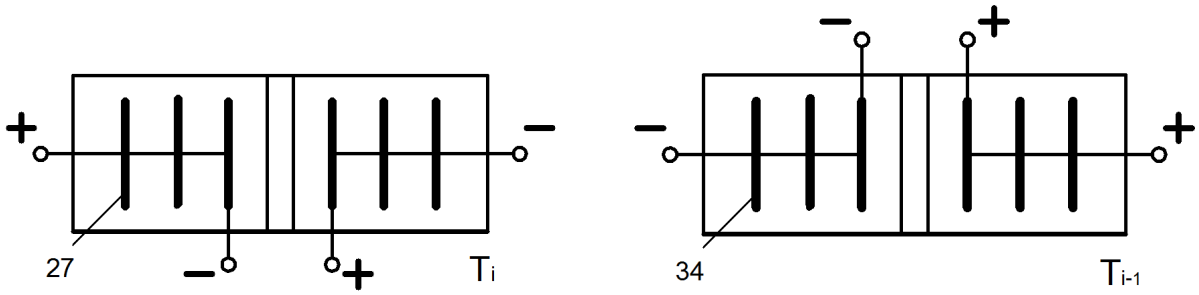
21, 30 – отвори в тілах гальмівної колодки і у фрикційній накладці; 27, 34 – термоелектроди першої і другої групи термобатарей; 28 – термоізоляція; 29 – запобіжний корпус; 31 – приповерхневий шар фрикційної накладки; 32, 33 – виводи термоелектродів першої і другої груп термобатарей

Рисунок 2 – Загальний вид пластинчастої термопари в запобіжному корпусі (а) і без нього (б), схема встановлення термопар в основу колодки і накладку (в)

ють приповерхневий шар 31 в середній частині колодки 14, а в її основі 15 виконані отвори 21, через які пропущені виводи 32 і 33 термопар. Термоелектроди 27 першої групи термопар розташовані урівень сектора 20 накладки 17, тобто на її робочій поверхні 18.

Термоелектроди 34 другої групи термопар встановлені нижче, по висоті термоэлектродів 27 першої групи термопар, в приповерхневому шарі 31 сектора 20 накладки 17. Термоелектроди 27 першої групи термобатарей і термоелектроди 34 другої групи термобатарей встановлюються в окремі сектори накладок 17 (рис. 3).

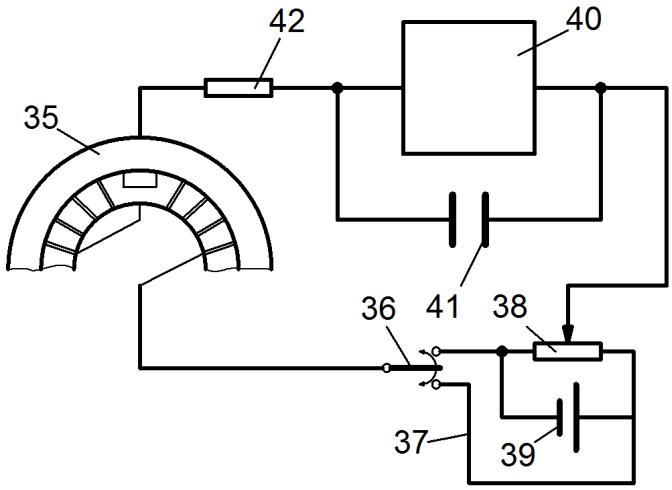
На рис. 4 зображено схему під'єднання вузла тертя до зовнішнього електричного ланцюга. Позитивні і негативні термоелектроди першої 27 і другої 32 груп термобатарей, що розташовані в різних секторах 20 накладки, які входять до складу вузла тертя 35, підключеного до зовнішнього електричного ланцюга. В схемі є перемикач струму 36 на прямий і зворотний напрямки струму і джерело постійного струму 37, що містить реостат 38 і батарею 39, які підключені до реєструючої апаратури 40. Реостат 38 потрібен для регулювання вихідної напруги батареї 39 і, відповідно, величини струму. У



а) б)

27 і 34 – термоелектроди першої і другої групи термобатарей

Рисунок 3 – Вигляд зверху на сектори фрикційної накладки з термобатареями першої (а) і другої (б) груп



35 – вузол тертя; 36 – перемикач електричного струму; 37 – джерело постійного струму; 38 – реостат; 39 – батарея; 40 – вимірювальна апаратура; 41 – конденсатор; 42 – терморезистор

Рисунок 4 – Схема включення вузла тертя гальма в зовнішню електричну мережу

свою чергу, до апаратури 40 для зменшення пульсацій напруги паралельно підключений конденсатор 41. Апаратура 40 реєструє постійний струм в ланцюзі. Між вузлом тертя 35 і апаратурою 40 в ланцюзі розташовано термокомпенсаційний опір 42.

Електричний струм, що виникає в замкненому ланцюзі термобатарей, охолоджує гарячий спай (термоелектроди 27 першої групи термопар, що розташовані урівень секторів 20 накладки 17, тобто на її робочій поверхні) і навпаки, підігрівають холодний спай. Холодний спай – термоелектроди 34 другої групи термопар, які встановлені нижче за термоелектроди 27 першої групи термопар в приповерхневому шарі 31 сектора 20 накладки 17 (перемикач 36 включений на прямий струм). Якщо, користуючись зовнішнім джерелом струму 37, пропустити через термобатареї струм зворотного напряму (перемикач 36 включений на зворотний струм), то він виділятиме теплоту на гарячому спаї і забиратиме теплоту від холодного. Таким чином, одні і ті ж термоелектроди 27 першої групи термопар і термоелектроди 34 другої групи термопар, з яких складаються термобатареї, можуть працювати як в режимі термоелектрогенератора, так і термоелектрохолодильника.

Барабанно-колодкове гальмо на стенді працює таким чином. Махові маси стенду розганяють до заданої швидкості і виконують гальмування. В процесі гальмування барабанно-колодкового гальма розтискний кулак (на кресленні не показаний) розводить гальмівні колодки 14, фрикційні накладки 17 яких своїми робочими поверхнями 18 взаємодіють з робочими поверхнями 3 ободу 2 гальмівного барабану 1. В результаті циклічних гальмувань досягається нагрівання пар тертя гальма до заданого стану. При цьому виникають теплові потоки, спрямовані в тіло обода 2 барабану 1 і в приповерхневий шар 31 фрикційної накладки 17, а саме в тіло накладки 17 і в основу 15 гальмівної колодки 14.

Фрикційне розігрівання поверхневих шарів 31 секторів 20 накладок 17 і робочої поверхні 3 ободу 2 гальмівного барабану 1 відбувається в умовах істотного перевищення темпу генерації теплоти на поверхнях вузла тертя 35 над темпом відведення теплоти в об'єми його елементів. При цьому поверхневі шари 31 секторів 20

фрикційних накладок 17 можуть розм'якшуватися і розплющуватися; також можуть оплавлюватися їх мікронерівності в контакті, що призведе до збільшення розміру і кількості плям контакту і фактичної площі контакту.

Крім вищезазначеного, фрикційне нагрівання може призвести до істотних теплових деформацій елементів вузла тертя 35 і, як наслідок, до нерівномірності мікроконтакту, що виражається в появі окремих нерухомих або таких, що рухаються поверхнями тертя, «гарячих» плям контакту. Утворення мікроскопічних «гарячих» плям спостерігається у ході досліджень енергонавантажених режимів тертя як стаціонарних, так і нестаціонарних полів. Останні значною мірою залежать від поляризованого стану секторів 20 накладок 17 барабанно-колодкового гальма.

Визначення локальних енергетичних рівнів у фрикційних матеріалах накладок колодок гальма барабанно-колодки в стендових умовах. Спонтанно поляризований стан поверхонь фрикційних накладок барабанно-колодкового гальма може бути стійким у тому випадку, коли він є енергетично більш вигідним, ніж неполяризований стан. При цьому для спонтанно поляризаційного стану потрібно враховувати не тільки енергію поверхонь фрикційних накладок, але і енергію зовнішнього електричного поля.

Вимірювання температурностимулюючих енергетичних струмів, викликаних стаціонарними полями, є одним з розповсюджених методів визначення локальних енергетичних рівнів у фрикційних матеріалах накладок барабанно-колодкового гальма в стендових умовах. Загальна експериментальна процедура цього методу включає чотири стадії.

Розглянемо особливості кожної із стадій окремо.

Перша стадія. Вважаємо, що за відсутності зовнішнього електричного поля ділянки поверхонь секторів 20 накладок 17 колодок 15 мають зовнішню поляризацію.

У результаті циклічних гальмувань барабанно-колодкового гальма на гальмівному стенді відбувається нагрівання його взаємодіючих пар тертя до заданого теплового стану. При цьому один з секторів 20 фрикційної накладки 17, зі встановленими у ньому термоелектродами 27 першої групи термопар, торці яких знаходяться урівень його робочій поверхні при початковій температурі T_i, підключаються до зовнішнього джерела електричного струму 37, подаючи прямий електричний струм на вузол тертя 35. При цьому електричний струм охолоджує гарячий спай (термоелектроди 27 першої групи термопар) і навпаки, підігріває холодний спай (термоелектроди 34 другої групи термопар, встановлені нижче за термоелектроди 27 першої групи термопар в приповерхневому шарі 31 одного з секторів 20 накладки 17). При цьому термоелектроди 27 першої групи термопар є термобатареями, які працюють в режимі термоелектрогенераторів. Таким чином, ділянки поверхонь одного з секторів 20 накладки 17 знаходяться під впливом постійного електричного поля F_p при температурі T_{i+1}. Крім того, зовнішня поляризація ділянок поверхонь секторів 20 накладок 17 сприяє виникненню додаткового електричного поля. Перша стадія має підготовчий характер.

Друга стадія. Проводиться подача зворотного струму (за допомогою перемикача 36) від зовнішнього джерела електричного струму 37 на вузол тертя 35. В цьому випадку термоелектроди 27 першої групи термопар охолоджуватимуться і будуть холодними спаями, а термоелектроди 34 другої групи термопар будуть гарячими спаями. При цьому термоелектроди 27 першої групи термопар є термобатареями, які працюють в режимі термоелектрохолодильників за рахунок зміни полярності. Таким чином, ділянки поверхонь одного з секторів 20 накладки 17 охолоджуються до температури T_{i-1}, знаходячись під дією того ж електричного поля, що і на першій стадії експериментальних досліджень.

Третя стадія. Проводиться подача прямого і зворотного струму циклічно за допомогою перемикача 36 від зовнішнього джерела електричного струму 37 на вузол тертя 35. В цьому випадку термоелектроди 27 першої групи термопар, що є термобатареями, працюватимуть в режимах термоелектрогенератора і термоелектрохолодильника і тим самим матимуть місце змішані процеси «нагрівання – охолоджування» ділянок поверхонь одного з секторів 20 накладки 17 за температури T_{i-1}, але при цьому досягається зміна величини електричного поля до значення F_P.

Четверта стадія. Проводиться подача прямого струму (за допомогою перемикача 36) від зовнішнього джерела електричного струму 37 на вузол тертя 35. При цьому термоелектроди 27 першої групи термопар, що є термобатареями, працюватимуть в режимі термоелектрогенератора, забезпечуючи з квазіпостійним темпом нагрівання ділянок поверхонь одного з секторів 20 накладки 17 в довільному електричному полі F_P до температури T_{i+2}.

За умови, що на даній стадії довільне електричне поле $F_P = 0$, відбувається температурно-стимулюючий перехід від стану, поляризованого полем F_d, до рівноважного неполяризованого стану. В цьому випадку, якщо вільні заряди в секторі 20 накладки 17 відсутні або їх перенесення заборонено, температурні залежності вимірюваних електричних струмів міститимуть максимуми, які називаються піками термоелектростимульованої деполяризації (рис. 6, піки 2).

Температурні залежності електричних струмів міститимуть піки, і за наявності протилежного процесу – поляризації сектора 20 накладки 17 від рівноважного неполяризованого

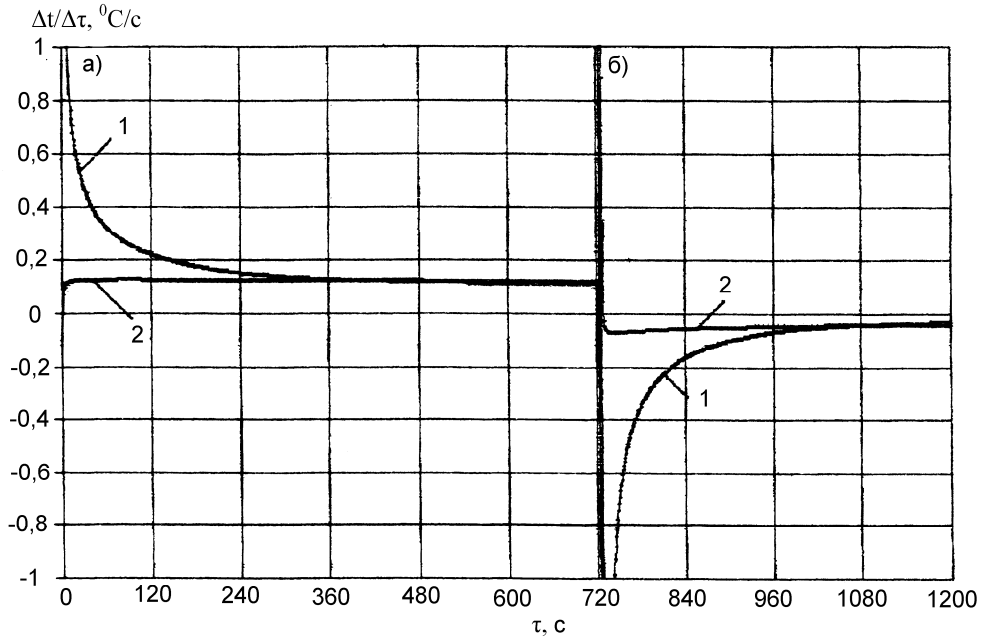
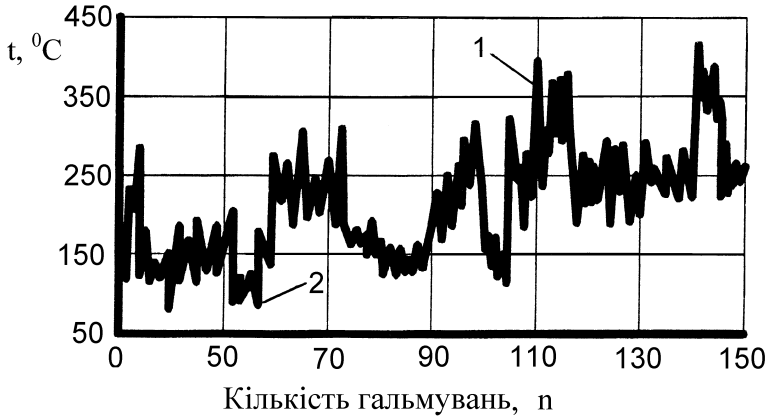


Рисунок 5 – Квазіпостійний темп нагрівання (а) і охолодження (б) робочої (1) і неробочої (2) поверхонь фрикційної накладки



1, 2 – піки: поляризаційні і деполяризації

Рисунок 6 – Закономірності зміни поверхневих температур фрикційних накладок заднього барабанно-колодкового гальма транспортного засобу при аперіодичних гальмуваннях на гірському маршруті

стану до стану, поляризованого полем F_P. Піки, які спостерігаються в такому процесі, називають піками термоелектростимульованої поляризації.

Густина електричного струму (j), що виникає за рахунок зміни поляризації (P) ділянок поверхні сектора 20 накладки 17 в часі (t) визначаються виразом

$$j(t) = \frac{dP(t)}{dt}. \qquad (2)$$

За аналогією з виразом (1) похідна $dP_O(t)/dt$ визначається як густина струму $j_O(t)$, що пов'язана із зміною рівноважної поляризації сектора 20 накладки 17.

Основною стадією експериментів з вимірюванням температурно-стимулюючих електричних струмів є нагрівання з квазіпостійним темпом секторів 20 накладки 17

$$T_{i+1}(t) = T_i + bt, \qquad (3)$$

де T_i, T_{i+1} – абсолютні температури: на початку і наприкінці процесу нагрівання сектора 17 фрикційної накладки 20, К;

$b = dT(t)/dt$ – коефіцієнт квазіпостійного темпу нагрівання поверхні сектора 20 фрикційної накладки 17 (рис. 5, а).

Визначимо рівноважну поляризацію $P_O(T_i)$, що виникає в слабкому зовнішньому електричному полі F, за допомогою виразів

$$P_O(T_i) = N\chi(T_i)F; \qquad (4)$$

$$\chi(T_i) = M^2/nk_eT_i; \qquad (5)$$

де N – концентрація переорієнтованих полярних включень, що характеризуються дипольним моментом M і поляризованістю $\chi(T_i)$, яку подаємо наближено у вигляді нерівності

$$MF \le k_в T_{i-1}, \qquad (6)$$

де $k_в$ – постійна Больцмана;

n – розміри простору можливих орієнтацій диполя.

Як початкове значення поляризації $P(T_i)$ вибираємо рівноважну поляризацію, одержану в результаті охолодження ділянок поверхонь секторів 20 фрикційних накладок 17 в електричному полі. Вважаємо, що за відсутності зовнішнього електричного поля ділянки поверхонь секторів 20 накладки 17 мають зовнішню поляризацію.

Остання може бути врахована введенням додаткового електричного поля F_O, так що MF_O (при $MF_O \le k_в T$) описує зсув мінімумів відповідних орієнтаційних потенціальних ям. Тоді повні електричні поля, що діють на полярні включення секторів 20 накладки 17 в процесах охолодження і нагрівання, рівні $F_O + F_d$ і $F_O + F_P$ відповідно. Переходячи від змінної t до температур T_{i+1} і T_{i+2} з урахуванням того, що

$$P(T_{i+1}) = N\chi(T_{i+1})(F_O + F_d),$$
$$P_O(T_{i+2}) = N\chi(T_{i+2})(F_O + F_P) \qquad (8)$$

подаємо шукану густину електричного струму в такому вигляді:

$$j(T_{i+1}) = N\chi(T_i)\Phi(T_{i+1})\times$$
$$\times[F_P - F_d - \psi(T_{i+2})(F_P - F_O)]; \qquad (9)$$

де

$$\Phi(T_{i+1}) = \omega(T_{i+1})\exp[-\alpha(T_{i+1})];$$
$$\psi(T_{i+2}) = T_i \int_{T_i}^{T_{i+2}} \frac{dT'}{T'^2}\exp[\alpha(T')];$$
$$\alpha(T') = b^{-1}\int_{T_)}^{T} dT'\omega(T'); \qquad (10)$$

$\omega(T_{i+1})$ – функція температури релаксації;

T' – поточні значення температури поверхонь ділянок секторів накладок, значення якої знаходяться між температурами T_{i+1} і T_{i+2}.

Залежності (9) і (10) справедливі для довільного виду функцій $\omega(T_{i+1})$. Із залежностей (9) і (10) випливає ряд теоретичних висновків, що стосуються термоелектричної поляризації поверхонь секторів 20 накладки 17 барабанно-колодкового гальма.

Спектри термостимулірованої деполяризації реєструються в умовах, коли $F_P = 0$. Якщо при цьому і $F_0 = 0$, то відповідні електричні струми негативні, оскільки $F_d > F_P$, а їх температурна залежність визначається виглядом функції $\Phi(T_{i+1})$. При $F_O > 0$ амплітуда піків термостимульованої деполяризації збільшується за рахунок співмножника $[F_d + \psi(T_{i+2})F_O]$, коли поляризоване електричне поле посилюється за рахунок додаткового; при цьому форма піків спотворюється за рахунок функції $\psi(T_{i+2})$. В звичайних умовах спектри термостимульованої поляризації вимірюються при $F_d = 0$. В цьому випадку електричні струми за рахунок співмножника $[F_P - \psi(T_{i+2})(F_P - F_O)]$ додатні за невисоких поверхневих температур секторів 20 накладки 17 і від'ємні – при їх високих величинах. За умови $F_d = F_P$, тобто коли довільне електричне поле F_P, що виникає на поверхнях секторів 20 накладки 17, дорівнює поляризованому електричному полю F_d при незначному додатковому електричному полі F_0, також спостерігаються від'ємні піки струмів термостимульованої поляризації, що описуються функціями $\Phi(T_{i+1})$ і $\psi(T_{i+2})$.

Як приклад, на рис. 6 проілюстровано закономірності зміни поверхневих температур фрикційних накладок з поляризаційними (1) і деполяризаційними (2) піками заднього барабанно-колодкового гальма транспортного засобу при аперіодичних гальмуваннях на маршруті. Зв'язок між поляризаційною і деполяризаційною енергонавантаженістю поверхонь фрикційних накладок колодок барабанно-колодкового гальма транспортного засобу з генерованими електричними струмами, визначаються за допомогою роботи ($W_П$), яка виконується зарядами на поверхнях секторів 20 фрикційних накладок 17

$$W_П = k_в \frac{\ln\left(\frac{I_2 T_1^2}{I_1 T_2^2}\right)}{\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}}, \qquad (11)$$

де I_1 і I_2 – струми, які відповідають температурам на поверхні секторів 20 фрикційних накладок 17, нА;

T_1 і T_2 – температури на початку і наприкінці процесів нагрівання і охолоджування секторів 20 фрикційних накладок 17.

Аналітичні рішення (9) і (10) дають змогу з концептуальних позицій описувати змішані процеси, що включають поляризаційну підготовку секторів 20 фрикційних накладок 17 гальмівних колодок 14 барабанно-колодкового гальма при їх охолоджуванні під час роботи термобатарей в режимі термоелектрохолодильника і дією поляризованого зовнішнього електричного поля, створюваного термобатареями у режимі термоелектрогенератора при їх нагріванні з квазіпостійним темпом.

Висновки

Таким чином, запропонована система термоелектричної поляризації поверхонь фрикційних накладок барабанно-колодкового гальма в стендових умовах за рахунок змішаних процесів («нагрівання – охолодження»), що реалізовуються за допомогою термобатарей, які працюють в режимах термоелектрогенератора і термоелектрохолодильника, а також зовнішніх електричних полів, що діють на поверхні поляризованих накладок. При цьому досягаються:

- можливість зміни напряму струму в зовнішньому електричному ланцюзі для термоелектричної поляризації ділянок поверхонь сектора накладок колодок;
- можливість роботи термобатарей, вмонтованих в сектори фрикційних накладок гальмівних колодок, в режимі термоелектрогенератора і термоелектрохолодильника, забезпечуючи тим самим змішані процеси (нагрівання і охолодження) ділянок поверхонь сектора;
- використання змінного темпу нагрівання ділянок поверхонь секторів накладок колодок за допомогою термобатарей, що працюють в режимах термоелектрогенератора і термоелектрохолодильника;
- можливість на всіх стадіях термоелектричної поляризації ділянок поверхонь сектора накладок колодок управляти їх енергонавантаженістю (тепловим станом), а також електричними полями;
- можливість оцінки термоелектричної поляризації ділянок поверхонь сектора накладок колодок шляхом введення в аналітичні залежності додаткового, довільного і поляризованого електричних полів і процесів самовільного повернення системи з стану неврівноваженого відхилення в стан рівноваги, тобто здійснити релаксацію.

Література

1 Розенбаум В.М. Аналитическое описание токов термостимулированной поляризации и деполяризации / В.М. Розенбаум, О.Е. Цемчик / Физика твердого тела. – 2010. – том 52, вып. 10. – С. 2046 – 2051.

2 Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) / Под общ. ред. А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 2003. – 575 с.

3 Хайнике Г. Трибохимия / Г. Хайнике. – М.: Мир, 1987. – 587 с.

4 Трибологія / М.В. Кіндрачук, В.Ф Лабунець, М.І. Пащенко, Є.В Корбут. – К.: Вид-во нац. авіац. ун-ту „НАУ – друк”, 2009. – 392 с.

5 Пат. 2459986 С2 России, МПК F16D 65/82, F16D 51/10. Способ определения составляющих электрических токов в парах трения «полимер – металл» барабанно-колодочного тормоза при их нагревании в стендовых условиях (варианты) / А.И. Вольченко, Н.А. Вольченко, Д.А, Вольченко, И.В. Бачук, А.Н. Горбей, П.А. Поляков; заявитель и патентодатель Иван-Франковск. национал. техн. ун-т нефти и газа. – Заявл. 26.02.2010; Опубл. 27.08.2012, Бюл. № 24. – 14 с.

6 Пат. 2462628 С2 России, МПК F16D 65/82, F16D 51/10. Способ определения направлений составляющих электрических токов в парах трения «полимер – металл» барабанно-колодочного тормоза при их нагревании в стендовых условиях / А.И. Вольченко, Н.А. Вольченко, Д.А, Вольченко, И.В. Бачук, А.Н. Горбей, П.А. Поляков; заявитель и патентодатель Иван-Франковск. национал. техн. ун-т нефти и газа. – Заявл. 19.04.2010; Опубл. 27.09.2012, Бюл. № 27. – 27 с.

7 А.с. 826072 СССР, МКИ^3. F04B 19/24. Термокомпрессор /М.С. Дзитоев, В.В. Чиковани, В.Г. Цихисели (СССР) – №2806851/25-06, заявл. 13.06.79, опубл. 30.04.81, Бюл. № 16-2 с.

Стаття надійшла до редакційної колегії
04.02.13
Рекомендована до друку
професором ***Вольченком О.І.***
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)
професором ***Мельником П.І.***
(Прикарпатський національний університет імені В. Стефаника, м. Івано-Франківськ)

Дослідження та методи аналізу

УДК 550.835

ОСОБЛИВОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ГАЗОНАСИЧЕННЯ ПЛАСТІВ-КОЛЕКТОРІВ ІЗ ГЛИНИСТО-КАРБОНАТНИМ ТИПОМ ЦЕМЕНТУ

В.А. Старостін, Я.М. Коваль, І.О. Федак

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 42056,
e-mail: geophys@nung.edu.ua

Гірські породи, які виповнюють продуктивні розрізи багатьох нафтогазових родовищ, характеризуються глинисто-карбонатним типом цементу. Для такого роду порід-колекторів заміщення глинистого цементу на карбонатний призводить до збільшення їх питомого електричного опору за рахунок зменшення вмісту зв'язаної води на поверхні карбонатної цементуючої речовини. У свою чергу, завищені значення питомого електричного опору порід-колекторів з глинисто-карбонатним типом цементу є причиною виникнення похибки у визначенні коефіцієнта газонасичення. З метою підвищення достовірності визначення коефіцієнта газонасичення пластів-колекторів пропонується модель електропровідності, яка враховує тип та кількісний вміст цементуючого матеріалу гірських порід. За основу створеної авторами моделі взято модель "двох вод" Вендельштейна Б.Ю. Електропровідність пластів-колекторів з глинисто-карбонатним типом цементу залежить від електропровідностей пластової води та води, зв'язаної карбонатною і глинистою компонентами цементу. Результати зіставлення теоретичних розрахунків за створеною моделлю із фактичними даними підтвердили високу її ефективність.

Ключові слова: коефіцієнт газонасичення, глинисто-карбонатний тип цементу, модель електропровідності, електричний опір, пористість.

Горные породы, наполняющие продуктивные разрезы многих нефтегазовых месторождений, характеризуются глинисто-карбонатным типом цемента. Для такого рода пород-коллекторов замещения глинистого цемента карбонатным приводит к увеличению их удельного электрического сопротивления за счет уменьшения содержания связанной воды на поверхности карбонатного цементирующего вещества. В свою очередь, завышенные значения удельного электрического сопротивления пород-коллекторов с глинисто-карбонатным типом цемента являются причиной возникновения погрешности при определении коэффициента газонасыщения. С целью повышения достоверности определения коэффициента газонасыщения пластов-коллекторов предлагается модель электропроводности, которая учитывает тип и количественное содержание цементирующего материала горных пород. В основание созданной авторами модели положена модель "двух вод" Вендельштейна Б.Ю. Электропроводность пластов-коллекторов с глинисто-карбонатным типом цемента зависит от электропроводности пластовой воды и воды, связанной карбонатной и глинистой компонентами цемента. Результаты сопоставления теоретических расчетов по созданной модели с фактическими данными подтвердили высокую ее эффективность.

Ключевые слова: коэффициент газонасыщения, глинисто-карбонатный тип цемента, модель электропроводности, электрическое сопротивление, пористость.

The rocks filling the productive sections of many oil and gas fields, are characterized by clay-carbonate type of cement. For this kind of reservoir rocks replacement clay cement on carbonate increases their resistivity by reducing the content of bound water on the surface of carbonate-hardening material. In turn, inflated the value of resistivity reservoir rocks of clay-carbonate type of cement is the cause of the error in determining the coefficient of gas saturation. To improve the accuracy of determining the coefficient of reservoir gas saturation authors proposed the model of conductivity, which takes into account the type and quantitative cementing material of rocks. For the basis of established model by the authors the model of "two waters" by Vendelshteyn B.Y. is taken. Electrical conductivity

of reservoir with clay-carbonate type of cement depends on the electrical resistance of formation water and water who bound carbonate and clay component of cement. The results of the comparison of theoretical calculations according to created model with actual data have confirmed the high level of its efficiency.

Key words: the coefficient of gas saturation, clay-carbonate type of cement, the model of electrical conductivity, electrical resistance, porosity.

На нафтогазових родовищах України значна кількість пластів-колекторів характеризується наявністю у їх скелеті глинисто-карбонатного типу цементу. Залежно від пропорції глинистої і карбонатної компонент цементу породи пласт-колектор характеризується різним питомим електричним опором. Заміщення частки глинистої речовини цементу карбонатним домішком призводить до зменшення вмісту щільно зв'язаної води і, відповідно, до збільшення питомого електричного опору [1, 2, 3]. Тому визначення коефіцієнта газонасичення пластів-колекторів із переважаючим вмістом карбонатної речовини у цементі за даними електрометрії свердловин призводить до значних похибок.

Можливості урахування складу цементу гірських порід для визначення коефіцієнтів газонасичення пластів-колекторів є вкрай обмеженими, що пов'язано з малою кількістю досліджень кернового матеріалу, а використання узагальнених моделей електропровідності ускладнено значною неоднорідністю цементної фракції у продуктивних породах.

Отже, визначення складу цементу гірських порід за даними геофізичних досліджень свердловин (ГДС) і його врахування у моделі електропровідності гірських порід є актуальним завданням, вирішення якого призведе до підвищення достовірності визначення коефіцієнтів газонасичення пластів-колекторів з глинисто-карбо-натним типом цементу.

Проведено дослідження впливу складу цементу гірських порід на їх питомий електричний опір на прикладі продуктивних відкладів Богородчанського газового родовища. Аналіз результатів свердловинних досліджень свідчить, що пласти-колектори цього родовища мають нетипове відображення у геофізичних полях.

Колекторами газу на даному родовищі є пласти і прошарки пісковиків та алевролітів Косівської світи верхньотортонського під'ярусу, які нерівномірно розподілені серед аргілітів, що складають основну частину розрізу [4]. За умовами утворення породи-колектори відносяться до осадових відкладів, за мінеральним складом – до теригенного типу, а за морфологією порового простору – до міжгранулярного типу. Гранулярні колектори верхньотортонських відкладів класифіковано як складнопобудовані, оскільки вони характеризуються складною структурою порового простору, неоднорідним цементом, двофазним насиченням у межах одного пласта (газ і вода). За характером змочуваності поверхні твердої фази колектори верхньотортонських відкладів відносяться до гідрофільних. За результатами досліджень кернового матеріалу пласти-колектори Богородчанського газового родовища характеризуються глинисто-карбонатним та карбонатно-глинистим типом цементу.

Пісковики продуктивного горизонту світлосірі, неміцні, слабко- і середньовапнисті (4-14 %), дрібнозернисті, алевритисті і алевритові, характеризуються високим ступенем відсортованості зерен (табл. 1).

Таблиця 1 – Гранулометричний склад пісковиків

№ з/п	Розмір фракції, мм	Вміст фракції, %
1	0,5-0,25	4-25,6 %
2	0,25-0,1	35,6-64,7 %
3	0,1-0,05	15,2-32,5 %
4	0,05-0,01	3,8-20,6 %

За мінеральним складом пісковики кварцеві (73-78 %) з уламками польових шпатів, кварцеподібних порід, рідше аргілітів з пластинками мусковіта (загалом не більше 3-5 %). Кварц кутуватий і напівокатаний, нерідко слабокородований кальцитом цементу. Цемент базально-поровий, поровий, контактовий, глинисто-карбонатний (тонкозернистий кальцит в суміші з глинистою речовиною) з поодинокими дрібними (до 0,2 мм) зернами глауконіту, піриту і лейкоксену. Інколи цементуюча маса слабко збагачена органікою. Текстура пісковиків у шліфі хаотична.

Алевроліти світло-сірі і сірі, здебільшого неміцні, рідше міцні, середньовапнисті (вміст карбонатів у перерахунку на $CaCO_3$ коливається від 12 % до 16 %), переважно різнозернисті, піщанисті, інколи піщані. Середній розмір зерен досліджуваних алевролітів коливається від 0,03 мм до 0,08 мм (табл. 2). Зерна скелету породи добре відсортовані.

Таблиця 1 – Гранулометричний склад алевролітів

№ з/п	Розмір фракції, мм	Вміст фракції, %
1	0,5-0,25	1-8 %
2	0,25-0,1	3-35 %
3	0,1-0,05	35-58,6 %
4	0,05-0,01	17-78 %

За мінеральним складом – це кварцеві (50-74 %) породи з мусковітом (не більше 1 %), поодинокими уламками кварцеподібних порід, польовими шпатами і лусками хлориту. Окремі кварцеві зерна слабкокородовані цементом кальциту. Зазвичай цемент неміцний, базальний, базально-поровий і поровий, глинисто-карбонатний (мікро- і тонкозернистий кальцит у суміші з пелітоморфною глинистою речови-

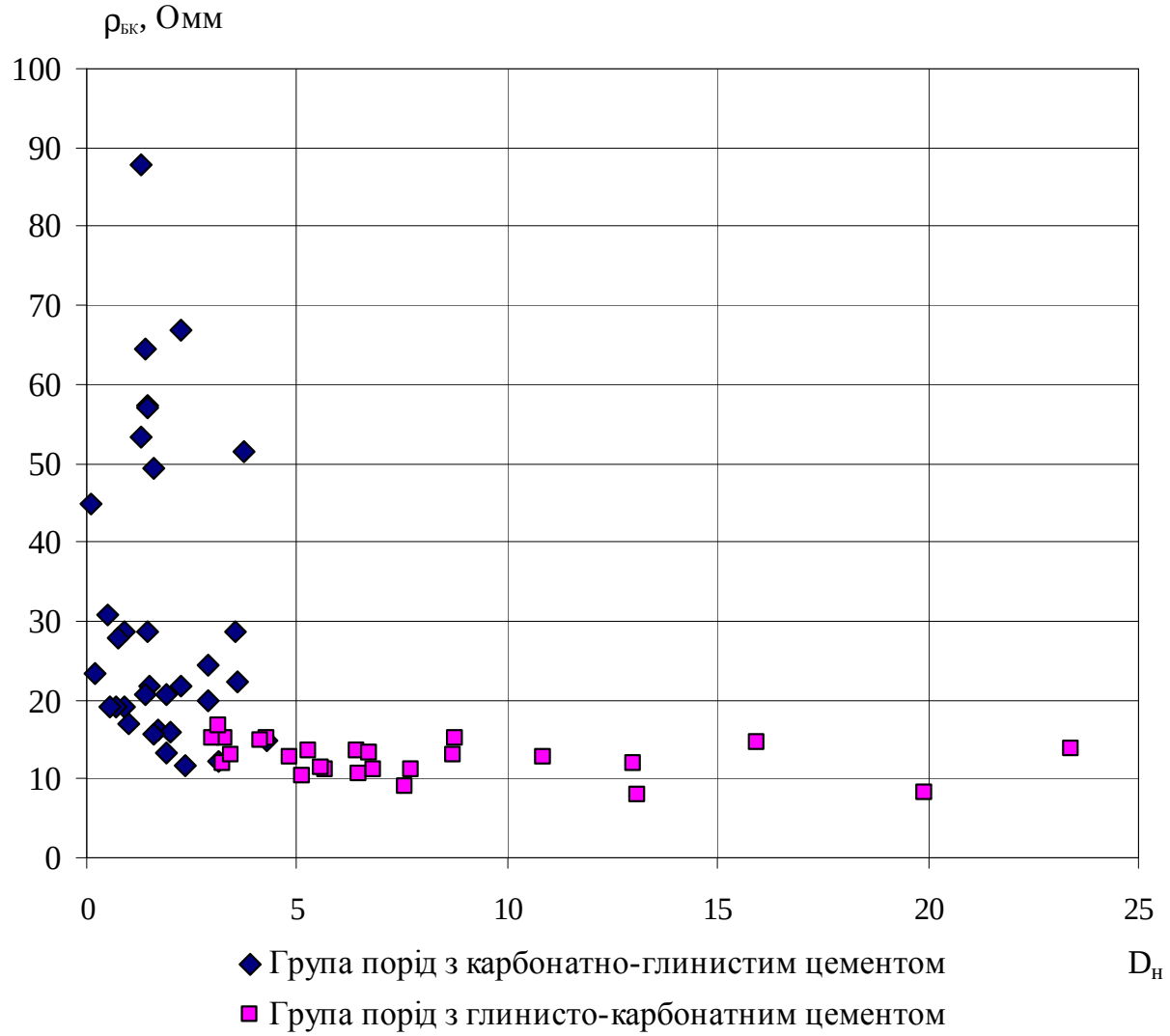


Рисунок 1 – Зіставлення нормованого параметра водонасичення глинистої фракції порід-колекторів $D_н$ з їх питомим електричним опором по боковому каротажу $\rho_{БК}$

ною), з глауконітом (до 2 %), піритом (до 1 %), окремими зернами лейкоксену і ангідриту. Іноді в цементі зустрічається бура органічна речовина (до 2 %).

Текстура алевролітів у шліфі нечітко шарувата, завдяки субпаралельному орієнтуванню окремих пластинчастих зерен, інколи тонкошарувата завдяки нерівномірному розподілу уламкового матеріалу, рідше хаотична.

Абсолютна проникність, визначена на взірцях керну, змінюється від $0{,}01\times10^{-3}$ мкм^2 до $491{,}6\times10^{-3}$ мкм^2; а за результатами випробування – 48×10^{-3} мкм^2 – 86×10^{-3} мкм^2. Залишкове газонасичення коливається в межах від 2 % до 25,8 %.

Підтвердженням впливу карбонатної речовини, що міститься у цементі породи-колектора, на збільшення її питомого електричного опору $\rho_п$, є побудований графік (рис. 1) зіставлення значень питомого електричного опору за боковим каротажем із значеннями нормованого параметр водонасичення глинистої фракції, який описується виразом:

$$D_н = \frac{\Delta I_\gamma}{\Delta I_{n\gamma} \cdot K_п}, \qquad (1)$$

де ΔI_γ – подвійний різницевий параметр природної γ-активності;

$\Delta I_{n\gamma}$ – подвійний різницевий параметр інтенсивності гамма-поля радіаційного захоплення теплових нейтронів;

$K_п$ – коефіцієнт пористості, ч.од.

Оскільки природна радіоактивність гірських порід визначається їх дисперсними властивостями та умовами басейну осадонакопичення, а інтенсивність гамма-випромінювання радіаційного поглинання нейтронів вмістом водню у гірській породі, то параметр $D_н$ вказує, яка кількість води знаходиться у глинистому цементі порід конкретної площі. Нормування параметра водонасичення глинистої фракції гірських порід коефіцієнтом пористості приводить значення параметру до одиниці об'єму порового простору.

Отже, вміст карбонатів у глинистому цементі є основним визначальним чинником зміни електропровідності порід-колекторів проду-

ктивного комплексу Богородчанського газового родовища. Тому, основною метою даної роботи є побудова моделі електропровідності глинисто-карбонатних порід-колекторів, яка враховуватиме властивості та кількісний вміст цементуючого матеріалу.

Дослідженню електропровідності складнопобудованих порід-колекторів присвячено багато наукових праць [5, 6, 7, 8]. Так, у роботі [8] Вендельштейном Б.Ю. доведено, що присутність глинистого цементу у породі може призводити як до зменшення, так і до збільшення її питомого електричного опору. За умови, що питомий електричний опір пластової води $\rho_в$ є більшим від питомого електричного опору подвійного шару $\rho_ш$, присутність глин призводить до зменшення питомого електричного опору, а за умови $\rho_в<\rho_ш$ заглинизованість викликає його збільшення.

Дані геофізичних досліджень свердловин електричними методами і результати промислових випробувань показали, що питомий електричний опір пласта зменшується зі збільшенням глинистості, що, в свою чергу, вказує на справедливість першої умови – $\rho_в>\rho_ш$.

У роботі [9] Елланським М.М. експериментально доведено існування залежності, встановленої Вендельштейном Б.Ю. [8], і визначено величину електропровідності подвійного електричного шару, яка забезпечує рівновагу у електропровідності електроліту і подвійного електричного шару. Ця мінімальна величина становить $\rho_ш$≈1/4,54 См/м≈0,22 Омм і є характерною для щільного глинистого цементу.

Для створення моделі електропровідності порід-колекторів з глинисто-карбонатним цементом нами взято за основу модель "двох вод". У 1960 р Вендельштейном Б.Ю. [8] запропонована модель електропровідності, в якій існує два провідника електричного струму – пластова вода та зв'язана вода (подвійний електричний шар). Пластова вода знаходиться у поровому просторі, а зв'язана вода присутня як адсорбційна вода дисперсної частини породи. Дана модель має вигляд:

$$\frac{1}{\rho_{кан}}=\frac{Z_ш}{\rho_ш}+\frac{1-Z_ш}{\rho_в}, \qquad (2)$$

де $\rho_{кан}$, $\rho_в$ і $\rho_ш$ – відповідно питомий електричний опір порового каналу, пластової води і подвійного електричного шару, Ом·м;

$Z_ш$ – частка порового каналу, зайнятого адсорбційною водою, ч.од.

Вендельштейном Б.Ю. доведено, що величина питомого електричного опору подвійного електричного шару не залежить від мінерального складу глинистої маси, а залежить від її структури.

При створенні моделі електропровідності порід-колекторів зроблено припущення про те, що подвійний електричний шар і адсорбційна вода на поверхні дисперсних частинок глинистої маси займають один і той самий об'єм:

$$Z_ш=\beta_{гл}=\frac{K_{гл}\cdot\omega_{гл}}{K_п}, \qquad (3)$$

де $\beta_{гл}$ – частка об'єму відкритих пор, зайнятих адсорбційною водою, ч.од.;

$\omega_{гл}$ – вміст адсорбційної води, ч.од.;

$K_{гл}$ – коефіцієнт об'ємної глинистості, ч.од.;

$K_п$ – коефіцієнт пористості, ч.од.

Оскільки подвійний електричний шар знаходиться у тому ж об'ємі, що і адсорбційна вода, то він і є провідником електричного струму.

Для порід-колекторів із глинисто-карбонатним цементом модель (3) набуде вигляду:

$$Z_ш=\beta_{гл}=\frac{K_{гл}\cdot\omega_{гл}}{K_п}+\frac{K_{дом}\cdot\gamma\cdot\omega_{дом}}{K_п}, \qquad (4)$$

де $K_{дом}$ – вміст карбонатного домішку у цементі, ч.од.;

$\omega_{дом}$ – вміст адсорбційної води на поверхні карбонатного домішку, ч.од.;

γ – коефіцієнт, який характеризує структурні особливості карбонатного домішку.

Враховуючи модель "двох вод" (2) і модель (4), для порід-колекторів із глинисто-карбонатним цементом нами запропонована така модель питомого електричного опору:

$$\frac{\rho_п}{\rho_в}=\frac{1}{(K_п\cdot K_в)^m}\times \qquad (5)$$

$$\times\frac{1}{1-\left(\frac{K_{гл}\cdot\omega_{гл}}{K_п\cdot K_в}+\frac{K_{дом}\cdot\gamma\cdot\omega_{дом}}{K_п\cdot K_в}\right)\cdot\left(1-\frac{\rho_ш}{\rho_в}\right)},$$

де $\rho_п$ – питомий електричний опір породи, Омм;

$\rho_в$ – питомий електричний опір пластової води, Омм;

$K_п$ – коефіцієнт пористості, ч.од.

$K_в$ – коефіцієнт водонасичення, ч.од.;

m – структурний коефіцієнт, який характеризує будову порового простору досліджуваних порід-колекторів (m=1,29);

$K_{гл}$ – коефіцієнт об'ємної глинистості, ч.од.;

$\omega_{гл}$ – вміст адсорбційної води на поверхні глинистої речовини, ч.од.;

$K_{дом}$ – вміст карбонатного домішку у цементі, ч.од.;

$\omega_{дом}$ – вміст адсорбційної води на поверхні карбонатного домішку, ч.од.;

γ – коефіцієнт, який характеризує структурні особливості карбонатного домішку;

$\rho_ш$ – питомий електричний опір подвійного електричного шару, Омм.

Такого роду модель описує вплив двокомпонентного цементу на питомий електричний опір породи-колектора.

З метою оцінки впливу глинисто-карбонатного цементу на питомий електричний опір порід-колекторів проведені розрахунки $\rho_п$ з використанням запропонованої моделі (5) у діапазоні зміни вмісту карбонатного домішку $K_{дом}$ від 0,1 до 0,5 ч.од. Діапазон зміни значень коефіцієнта пористості $K_п$ та водонасичення $K_в$ отримано із результатів геофізичних досліджень свердловин Богородчанського родовища, виконаних ІФЕГДС [4]. Для розрахунків взято

значення питомого електричного опору пластових вод $\rho_в$=0,04 Омм, а значення питомого електричного опору подвійного електричного шару – $\rho_ш$=0,025 Омм. Структурний коефіцієнт m, який характеризує будову порового простору досліджуваних відкладів, прийнятий рівним m=1,29 [4], а коефіцієнт – γ=5,4. На рис. 2 відображено залежності зміни параметра пористості $P_п$ від коефіцієнта пористості $K_п$ для різних значень частки карбонатного домішку. З рисунку видно, що із збільшенням вмісту карбонатного домішку у діапазоні низьких значень пористості спостерігається значне зростання опору, а у діапазоні великих значень пористості – незначне.

Отже, вміст карбонатного домішку у цементі породи-колектора призводить до збільшення її питомого електричного опору, а в подальшому до недостовірного визначення коефіцієнта пористості та насичення. Для врахування впливу карбонатного домішку породи-колектора на її питомий електричний опір при визначенні підрахункових параметрів, необхідно використовувати запропоновану нами модель питомого електричного опору (5).

Для практичної реалізації запропонованої нами моделі питомого електричного опору необхідно визначити низку параметрів, які характеризують як колекторські, так і фізичні властивості породи-колектора. Великі труднощі виникають при визначенні вмісту карбонатного домішку $K_{дом}$ у цементі породи-колектора. Дуже важливо під час визначення коефіцієнта газонасичення прогнозувати тип цементу (глинисто-карбонатний чи карбонатно-глинистий). Тому, перед нами постає завдання пошуку способів визначення частки карбонатного домішку у цементі. Для вирішення цього завдання пропонується використовувати нейтронний гамма-каротаж, результати якого залежать від водневмісту породи-колектора [10].

Основна проблема визначення коефіцієнта насичення за моделлю (5) полягає у визначені геологічних характеристик, які входять до складу моделі електропровідності. В процесі перевірки можливості використання моделі (5) для визначення коефіцієнта газонасичення порід-колекторів Богородчанського родовища, нами проведено ряд досліджень, за результатами яких визначено значення параметрів, що входять до складу даної моделі.

Значення коефіцієнта пористості $K_п$ вибиралось як середнє арифметичне із значень, визначених за даними мікробокового каротажу, акустичного та гамма-каротажу. Для цього використовувались емпіричні моделі зв'язку петрофізичних параметрів ($P_п$, $\Delta T_п$, ΔI_γ) з колекторськими властивостями ($K_п$), які встановлені на основі лабораторних досліджень кернового матеріалу верхньотортонських відкладів Карпатського регіону [4, 11].

Значення питомого електричного опору пластової води $\rho_в$, яка насичує поровий простір верхньотортонських продуктивних відкладів, прийняте рівним 0,04 Омм [4].

Показник степеня m, що використовувався у моделі (5), прийнятий як m=2.

Коефіцієнт об'ємної глинистості $K_{гл}$ визначався за емпіричною формулою [10]:

$$K_{гл} = 1{,}72 - \sqrt{1{,}72^2 - 1{,}9 \cdot \Delta I_\gamma}\,, \qquad (6)$$

де ΔI_γ – подвійний різницевий параметр природної γ-активності.

Дана залежність встановлена на основі зіставлення результатів гранулометричного аналізу продуктивних порід-колекторів Карпатського регіону з їх природною γ-активністю, визначеною за даними лабораторної гамма-спектрометрії [12]. Лабораторні дослідження проводились ІФІНГ.

Вміст адсорбційної води на поверхні глинистого матеріалу $\omega_{гл}$, досліджуваних нами продуктивних відкладів розраховувався на основі результатів визначення ємності катіонного обміну [12].

Для визначення вмісту карбонатного домішку $K_{дом}$ у глинисто-карбонатному цементі використовувалась методика, запропонована у роботі [10], де $K_{дом}$=B.

Вміст адсорбційної води на поверхні карбонатного домішку $\omega_{дом}$ взято з літературних табличних даних [3, 13].

Для розрахунків значення питомого електричного опору подвійного електричного шару взяте рівним $\rho_ш$=0,025 Омм.

Коефіцієнт, який характеризує структурні особливості карбонатного домішку, приймався рівним γ=5,4.

У результаті підстановки наведених вище параметрів до формули (5) отримаємо індивідуальну модель питомого електричного опору порід-колекторів з глинисто-карбонатним цементом, які виповнюють геологічний розріз Богородчанського родовища:

$$\frac{\rho_п}{\rho_в} = \frac{1}{(K_п \cdot K_в)^m} \times \qquad (7)$$

$$\times \frac{1}{1 - \left(\frac{1{,}72 - \sqrt{1{,}72^2 - 1{,}9 \cdot \Delta I_\gamma} \cdot \omega_{гл}}{K_п \cdot K_в} + \frac{B \cdot \gamma \cdot \omega_{дом}}{K_п \cdot K_в} \right) \cdot \left(1 - \frac{\rho_ш}{\rho_в} \right)}$$

При зіставленні коефіцієнта газонасичення, визначеного за стандартною методикою, яку використовували для підрахунку запасів газу Богородчанського родовища [4], із значеннями $K_г$, визначеними за вище наведеною моделлю (7), встановлено, що величини відрізняються (рис. 3). Так, наприклад, в інтервалі 1106,0-1109,1м, який характеризується високим вмістом карбонатної речовини у цементі (B=0,48), коефіцієнт газонасичення визначений за стандартною методикою становить 81%, а за запропонованою нами моделлю (7) – $K_г$=72%, що вказує на значну похибку у визначенні $K_г$ за методикою, яка не враховує речовинний склад цементу гірської породи.

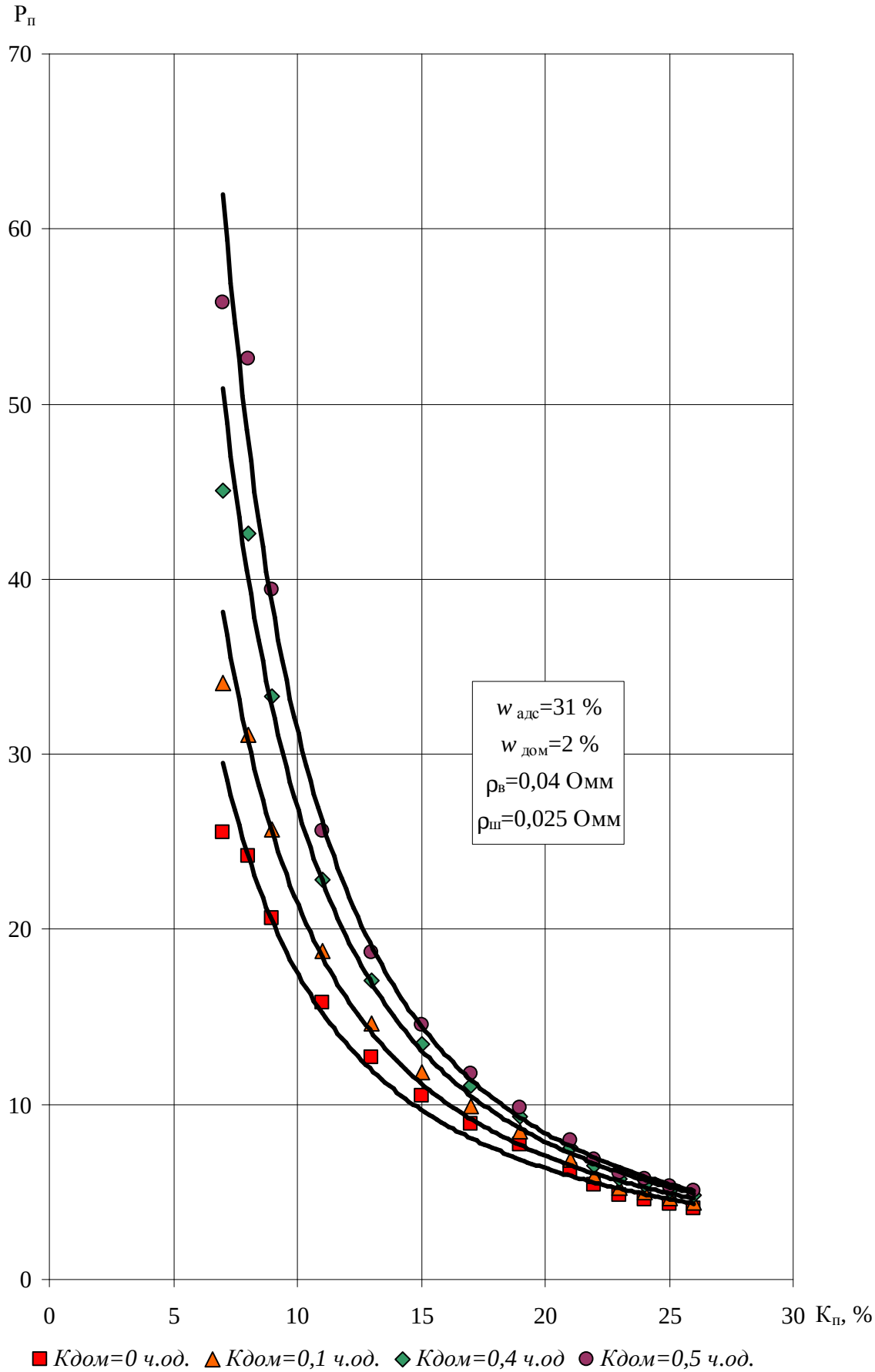


Рисунок 2 – Залежність параметра пористості $P_п$ від коефіцієнта пористості $K_п$ порід-колекторів із різним вмістом карбонатного домішку $K_{дом}$

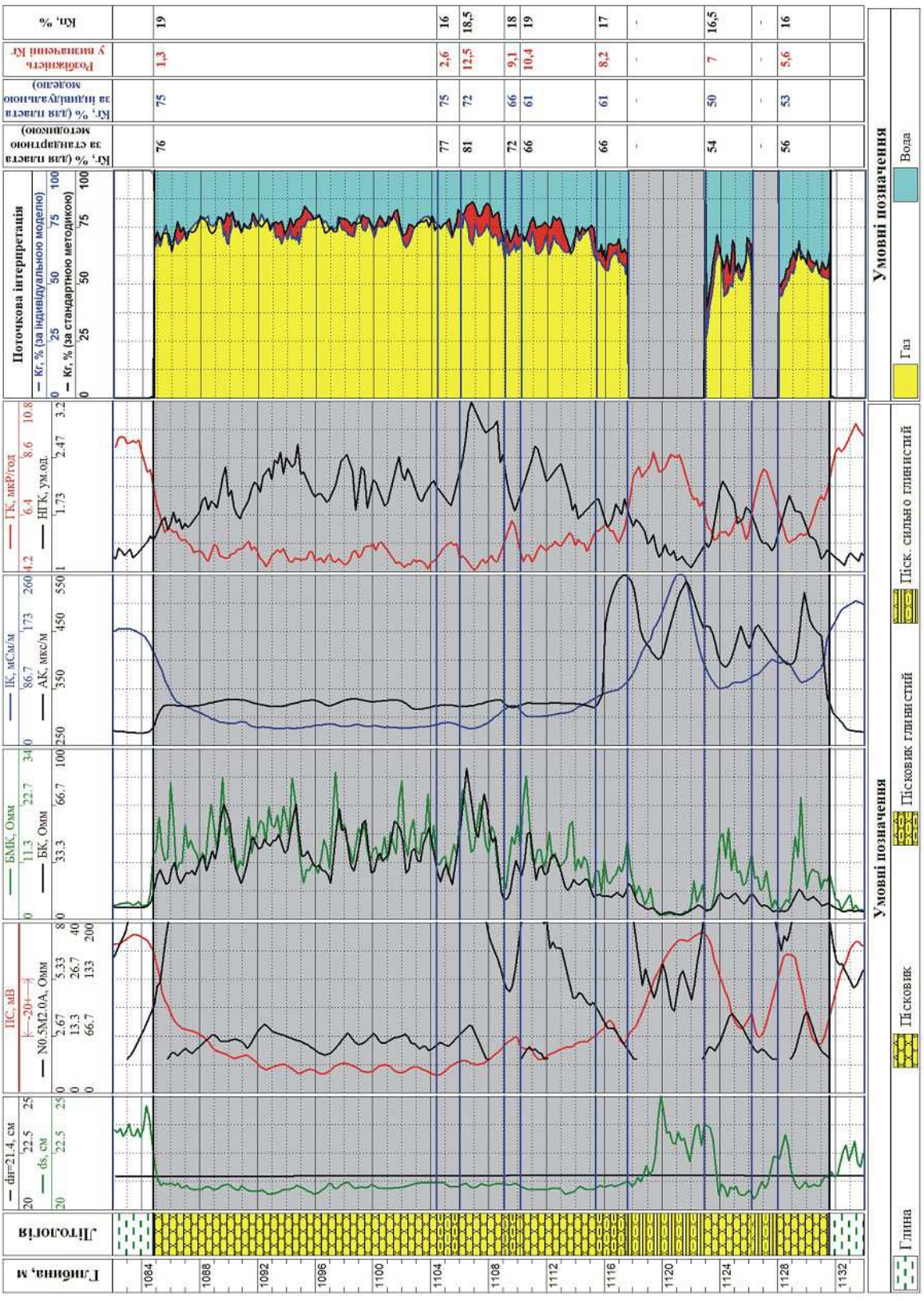


Рисунок 3 – Ефективність моделі електропровідності порід-колекторів з глинисто-карбонатним цементом (св. №67-Богородчани)

Отже, вміст карбонатного домішку у цементі породи-колектора впливає на її питомий електричний опір, а в подальшому і на визначення коефіцієнта газонасичення, що підтверджено нашими розрахунками та графічними побудовами. Для достовірного визначення коефіцієнта газонасичення необхідно використовувати модель питомого електричного опору, яка враховує неоднорідність мінерального складу цементу. В основу перспективи подальшої роботи буде покладено впровадження запропонованої нами індивідуальної моделі електропровідності глинисто-карбонатних порід-колекторів у виробництво.

Література

1 Вендельштейн Б.Ю. Методические рекомендации по определению подсчетных параметров залежей нефти и газа по материалам геофизических исследований скважин с привлечением результатов анализа керна, опробований и испытаний продуктивных пластов / Б.Ю. Вендельштейн, В.Ф. Козяр, Г.Г. Яценко. – Калинин: НПО "Союзпромгеофизика", 1990. – 261 с.

2 Ильинский В.М. Геофизические исследования коллекторов сложного строения / В.М. Ильинский, Ю.А. Лимбергер. – М.: Недра, 1981. – 208 с.

3 Кобранова В.Н. Физические свойства горных пород (петрофизика) / В.Н. Кобранова. – М.: Государственное научно-техническое издательство нефтяной и горнотопливной литературы, 1962. – 490 с.

4 Сводное заключение по Богородчанскому газовому месторождению (анализ результатов геофизических исследований скважин) / В.В. Кузьменко, М.В. Николюк, В.И. Грицишин, С.Я. Белик // Министерство геологии УССР трест "Укргеофизразведка". – Ивано-Франковская промыслово-геофизическая экспедиция. – Ивано-Франковск. 1969. – 71 с.

5 Старостін В.А. Індивідуальне моделювання електропровідності газонасичених порід-колекторів складної будови / В.А. Старостін, Я.М. Коваль // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2011. – №4(41). – С. 41-46

6 Александров Б.Л. Влияние температуры на удельное сопротивление и скорость распространения акустических волн в глинах / Б.Л. Александров, В.С. Афанасьев // Нефтегазовая геология и геофизика. – 1976. – №18. – С. 10-14.

7 Єфімов В.А. Петрофизические модели сложнопостроенных глинистых коллекторов для оценки их нефтегазонасыщения по данным электрометрии скважин: автореферат. дис. на соиск. уч. степени канд. геол.-минер. наук: спец. 00.30.03 "Геология нефти и газа" / В.А. Єфімов; Тюменский государственный нефтегазовый университет. – Тюмень, 1984.– 26 с.

8 Вендельштейн Б.Ю. О связи между параметром пористости, коэффициентом поверхностной проводимости, диффузионного–адсорбционными свойствами терригенных пород / Б.Ю. Вендельштейн // Труды МИНХ и ГП. – 1960. – № 31. – С. 16-30.

9 Элланский М.М. Петрофизические основы комплексной интерпретации данных ГДС: Методическое пособие / М.М. Элланский. – М.: ГЕРС, 2001. – 229 с.

10 Старостін В.А. Оцінка типу цементувального матеріалу порід-колекторів за даними нейтронного гамма-каротажу / В.А. Старостін, Я.М. Коваль // Нафтова і газова промисловість. – 2011. – №2(256). – С. 22-26.

11 Побудова фільтраційної моделі об'єктів зберігання газу Богородчанського ПСГ / Д.Д. Федоришин, В.А. Старостін, І.О. Федак, Я.М. Коваль // КНВП "Нафтогазтехсервіс" (заключний) – Івано-Франківськ, 2010. – 91 с.

12 Исследование закономірностей распределения радиоактивных элементов в горных породах-коллекторах месторождений Предкарпатья по промышленным и лабораторным данным / В.Я. Бардовский, В.А. Булмасов, В.А. Старостин, И.И. Прокопив, Г.А. Жученко // Министерство высшего и среднего образования УССР. – Ивано-Франковск: Ивано-Франковский институт нефти и газа, 1977. – 108 с.

13 Добрынин В.М. Петрофизика: Учебник для ВУЗов / В.М. Добрынин, Б.Ю. Вендельштейн, Д.А. Кожевников. – М.: Недра, 1991. – 368 с.

Стаття надійшла до редакційної колегії 28.02.12

Рекомендована до друку професором ***Орловим О.О.*** *(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ) професором* ***Максимчуком В.Ю.*** *(Інститут геофізики ім. С.І.Субботіна НАН України, Карпатське відділення, м. Львів)*

УДК 622.24.051

БАГАТОФАКТОРНА МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЕНЕРГОЄМНОСТІ ПРОЦЕСУ РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКОЇ ПОРОДИ

М.В.Мойсишин, Б.Д.Борисевич, Р.Б.Щербій, А.І.Бандура, І.Р.Михайлюк

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 727131,
e-mail: m a t h @ n u n g . e d u . u a

З метою встановлення багатофакторної математичної моделі енергоємності $\overline{W}_{П}$ процесу руйнування гірської породи, яка враховує спільний вплив режимних параметрів та параметрів бурильного інструменту, було використано метод раціонального планування експериментів. За цим методом комбінаційний квадрат експериментальних досліджень побудований таким чином, що комбінація змінних факторів, до яких відносяться осьове статичне навантаження F_{CT}, частота обертання долота n, коефіцієнт демпфування бурильного інструменту β та його жорсткість C, зустрічається тільки один раз. Тому загальну функцію можна подати добутком окремих функцій від змінних факторів – $\overline{W}_{П} = B_{CP} \cdot f(F_{CT}) \cdot f(n) \cdot f(\beta) \cdot f(C)$, де B_{CP} – усереднена за результатами експериментів стала, що залежить від типорозміру долота і механічних властивостей породи. Постійними факторами під час проведення планованого експерименту були витрата промивальної рідини, тип і діаметр тришарошкового долота та твердість гірської породи за штампом.

За результатами планованого експерименту рівняння багатофакторної математичної моделі енергоємності процесу руйнування гірської породи має вигляд

$$W_{П} = 626{,}237 \cdot e^{-1{,}503553 \cdot 10^{-3} \cdot F_{CT}^2} \cdot n^{0{,}284655} \cdot (1 + 3{,}7665635 \cdot 10^{-3} \cdot \beta - 2{,}9313621 \cdot 10^{-5} \cdot \beta^2) \times$$

$$\times (1 - 3{,}05692 \cdot 10^{-4} \cdot C + 9{,}54034 \cdot 10^{-8} \cdot C^2).$$

Мінімальне відхилення значень енергоємності, знайдених за цією формулою, від експериментальних склало 0,05%, а максимальне – 13,1%. Середнє відхилення обчислених значень енергоємності від експериментальних – 5,7%.

Ключові слова: енергоємність, математична модель, бурильний інструмент, планований експеримент, змінний фактор, руйнування гірської породи.

С целью установления многофакторной математической модели энергоемкости $\overline{W}_{П}$ процесса разрушения горной породы, которая учитывает совместное влияние режимных параметров и параметров бурового инструмента, был использован метод рационального планирования экспериментов. Согласно этому методу комбинационный квадрат экспериментальных исследований построен таким образом, что комбинация переменных факторов, к которым относятся осевая статическая нагрузка на долото F_{CT}, частота вращения долота n, коэффициент демпфирования бурильного инструмента β и его жесткость C, встречается только один раз. Поэтому общая многомерная функция может быть представлена как произведение отдельных зависимостей от переменных факторов – $\overline{W}_{П} = B_{CP} \cdot f(F_{CT}) \cdot f(n) \cdot f(\beta) \cdot f(C)$, где B_{CP} – усреднённая по результатам экспериментов постоянная, зависящая от типоразмера долота и механических свойств породы. Постоянными факторами при проведении планированного эксперимента были расход промывочной жидкости, тип и диаметр шарошечного долота, твердость горной породи по штампу.

По результатам планированного эксперимента уравнение многофакторной математической модели энергоемкости процесса разрушения горной породы имеет вид:

$$W_{П} = 626{,}237 \cdot e^{-1{,}503553 \cdot 10^{-3} \cdot F_{CT}^2} \cdot n^{0{,}284655} \cdot (1 + 3{,}7665635 \cdot 10^{-3} \cdot \beta - 2{,}9313621 \cdot 10^{-5} \cdot \beta^2) \times$$

$$\times (1 - 3{,}05692 \cdot 10^{-4} \cdot C + 9{,}54034 \cdot 10^{-8} \cdot C^2).$$

Минимальное отклонение значений энергоемкости, рассчитанных по этой формуле, от экспериментальных составило 0,05%, а максимальное – 13,1%. Среднее отклонение найденных значений энергоемкости от экспериментальных – 5,7%.

Ключевые слова: энергоемкость, математическая модель, бурильный инструмент, планируемый эксперимент, переменный фактор, разрушение горной породы.

With the purpose of establishment of multifactor mathematical model of energy capacity $\overline{W}_{П}$ of process of destruction of rock breed which takes into account the common influencing of regime parameters and parameters of boring instrument method of the rational planning of experiments was used. According to this method the combination square of experimental researches is built so that combination of variable factors which belong axial static loading F_{CT}, frequency of rotation of chisel n, damping factor β of boring instrument and his inflexibility C meets only one time. Therefore a public function can be given by work of separate functions from variable factors - $\overline{W}_{П} = B_{CP} \cdot f(F_{CT}) \cdot f(n) \cdot f(\beta) \cdot f(C)$, where – B_{CP} middle as a result of experiments became that depended on a

standard size chisel mechanical properties of breed. By permanent factors, during conducting of the planned experiment were expense of washing liquid, type and diameter of trihearded chisel and hardness of rock breed after stamp.

As a result of the planned experiment of equalization of multifactor mathematical model of energy capacity of process of destruction of rock breed will be

$$W_{П} = 626{,}237 \cdot e^{-1{,}503553 \cdot 10^{-3} \cdot F_{CT}^2} \cdot n^{0{,}284655} \cdot (1 + 3{,}7665635 \cdot 10^{-3} \cdot \beta - 2{,}9313621 \cdot 10^{-5} \cdot \beta^2) \times$$

$$\times (1 - 3{,}05692 \cdot 10^{-4} \cdot C + 9{,}54034 \cdot 10^{-8} \cdot C^2).$$

Minimum deviation of the values of energy capacity found after this formula, from experimental was 0,05%, and maximal - 13,1%. Mean value of rejection of the calculated values of energy capacity from experimental - 5,7%.

Key words: energy capacity, mathematical model, boring instrument, planned experiment, variable factor, destruction of rock breed.

Одним із головних завдань буріння свердловин є визначення витрати енергії на руйнування гірської породи. Ця витрата називається енергоємністю процесу буріння. Порівняльна оцінка впливу різних факторів на енергоємність процесу руйнування гірських порід здійснюється за величиною усередненої питомої об'ємної роботи $\overline{W}_{П}$, яка витрачається на руйнування 1см^3 гірської породи. Ця робота визначається за формулою [2]

$$\overline{W}_{П} = \frac{W}{V}, кГ \cdot м / см^3, \qquad (1)$$

де W – загальна робота під час руйнування породи;

V – об'єм зруйнованої породи.

Після низки перетворень та переходу до розмірності в Н·м одержимо

$$\overline{W}_{П} = 48 \frac{\overline{T}_{Д} \cdot n_{д}}{v_{м} \cdot d_{д}^2}, Н \cdot м / см^3, \qquad (2)$$

де $\overline{T}_{Д}$ – середнє значення обертального моменту на долоті (моментоємність), Н·м;

$n_д$ – частота обертання долота, хв$^{-1}$;

$v_м$ – механічна швидкість буріння, м/год;

$d_д$ – діаметр долота, см.

Згідно з результатами досліджень, наведених у [2, 3, 4], було встановлено вплив статичного осьового навантаження на вибій свердловини, частоти обертання долота та фізико-механічних властивостей породи на енергоємність процесу руйнування. В той же час стендові та промислові дослідження з вивчення впливу на енергоємність коефіцієнта демпфування та жорсткості бурильного інструменту не проводились.

Обґрунтований вибір характеристик пристрою, використання якого дозволяє змінювати зазначені вище параметри бурильного інструменту, можна здійснити тільки на основі експериментальних кореляційних залежностей між енергоємністю процесу руйнування породи та цими параметрами.

Враховуючи результати досліджень, наведених у [2, 3, 4], та результати досліджень, метою яких було встановлення впливу параметрів бурильного інструменту на енергоємність процесу руйнування породи, проведених авторами на буровому стенді ІФНТУНГ [6, 7], з метою встановлення багатофакторної математичної моделі енергоємності процесу руйнування гірської породи, яка враховує спільний вплив режимних параметрів та параметрів бурового інструменту на енергоємність, було використано метод раціонального планування експериментів [1, 5].

Дослідження проводили згідно спланованого чотирифакторного експерименту за рівнями зміни факторів (F_{CT}, n, β, C) у блоках пісковика воротищенської світи, твердість яких за штампом складала $р_ш$=2050 МПа. Матриця спланованого експерименту з експериментальними значеннями енергоємності наведена в таблиці 1.

У таблиці 2 подано результати експерименту, усереднені за режимними параметрами, а в таблиці 3 – усереднені за параметрами бурильного інструменту.

Результати підбору частинних емпіричних залежностей між змінними факторами та енергоємністю процесу руйнування гірської породи за експериментальними даними таблиці 1 наведено у таблиці 4.

Як бачимо найбільш суттєвим фактором зміни енергоємності є осьове статичне навантаження на долото. Зі зміною навантаження з 10 до 25кН енергоємність зменшилась у 2,122 рази. Ймовірність існування емпіричної залежності між енергоємністю та статичним осьовим навантаженням за криволінійною регресією більша 0,95.

Для підсилення впливу інших змінних факторів на енергоємність проводимо нейтралізацію впливу навантаження. Ця нейтралізація здійснюється двома способами: за методикою Протодяконова [1] та за методикою Яремійчука-Райхерта [5]. За методикою Протодяконова усі експериментальні дані $\overline{W}_{П.i}$ з таблиці 1 коректуються (перераховуються) за формулою

$$\overline{W}_{П.СК.1.i} = \overline{W}_{П.i} + \left[f(F_{CT.CP}) - f(F_{CT.i}) \right], \qquad (3)$$

де $f(F_{CT.CP})$ – значення енергоємності, визначене за формулою $W_{П} = 2381{,}986 \cdot e^{-1{,}503553 \cdot 10^{-3} \cdot F_{CT}^2}$ та за середнім значенням $F_{СТ}$=17,5кН;

$f(F_{CT.i})$ – значення енергоємності, визначені за формулою $W_{П} = 2381{,}986 \cdot e^{-1{,}503553 \cdot 10^{-3} \cdot F_{CT}^2}$ та за значеннями $F_{СТ}$=10, 15, 20 і 25кН.

За методикою Яремійчука-Райхерта усі експериментальні дані $\overline{W}_{П.i}$ таблиці 1 коректуються за формулою

Таблиця 1 – Результати досліджень за спланованим чотирифакторним експериментом

№ дос.	Частота обертання $n_{ДОЛ}$, хв$^{-1}$	Осьове статичне навантаження на долото $F_{СТ}$, кН	Жорсткість бурильного інструмента С, кН/м	Коефіцієнт демпфування β, кН·с/м	Енергоємність процесу руйнування $\overline{W}_{П.i}$, Н·м/см^3
1	82	10	400	0,1	1874
2	82	15	2500	40	1576
3	82	20	800	70	901
4	82	25	1700	90	691
5	133	10	800	90	1991
6	133	15	1700	70	1759
7	133	20	400	40	1325
8	133	25	2500	0,1	897
9	188	10	1700	40	1995
10	188	15	800	0,1	1538
11	188	20	2500	90	1248
12	188	25	400	70	1046
13	285	10	2500	70	2440
14	285	15	400	90	2215
15	285	20	1700	0,1	1231
16	285	25	800	40	1278

Таблиця 2 – Усереднення результатів планованого експерименту за режимними параметрами

$F_{СТ}$, кН\ $n_{ДОЛ}$, хв$^{-1}$	82	133	188	285	Сума	Середнє
10	1874	1991	1995	2440	8300	2075
15	1576	1759	1538	2215	7088	1772
20	901	1325	1248	1231	4705	1176,25
25	691	897	1046	1278	3912	978
Сума	5042	5972	5827	7164	24005	
Середнє	1260,5	1493	1456,75	1791		

Таблиця 3 – Усереднення результатів планованого експерименту за параметрами бурильного інструменту

С, кН/м β, кН·с/м	400	800	1700	2500	Сума	Середнє
0,1	1874	1538	1231	897	5540	1385
40	1325	1278	1995	1576	6174	1543,3
70	1046	901	1759	2440	6146	1536,5
90	2215	1991	691	1248	6145	1536,25
Сума	6460	5708	5676	6161	24005	
Середнє	1615	1427	1419	1540		

$$\overline{W}_{П.СК.2.i} = \overline{W}_{П.i} \frac{f(F_{СТ.СР})}{f(F_{СТ.i})}. \qquad (4)$$

Результати підбору частинних емпіричних залежностей між змінними факторами та енергоємністю процесу руйнування гірської породи за скоректованими даними, одержаними у випадку нейтралізації впливу осьового статичного навантаження згідно з методикою Протодьяконова, наведено у таблиці 5; а результати підбору частинних емпіричних залежностей за скоректованими даними, одержаними при нейтралізації впливу осьового статичного навантаження за методикою Яремійчука-Райхерта, наведено у таблиці 6.

В таблиці 7 подано результати підбору частинних залежностей $W_П$=f(n) за експериментальними та скоректованими даними.

Згідно з таблицею 7 кращою частинною залежністю $\overline{W}_П = f(n)$ є залежність, підібрана за скоригованими з використанням методики Яремійчука-Райхерта даними – $\overline{W}_П = 354{,}788 \cdot n^{0{,}284655}$. За цієї залежності середньоквадратичне відхилення є найменшим, а коефіцієнт кореляції – найвищим.

Таблиця 4 – Результати підбору частинних емпіричних залежностей за експериментальними даними

Змінний фактор	Частинні емпіричні залежності	Емпіричне значення коефіцієнта кореляції	Середнє квадратичне відхилення max/min
Осьове статичне навантаження	$W_{\Pi} = 2381{,}986 \cdot e^{-1{,}503553 \cdot 10^{-3} \cdot F_{CT}^2}$	-0,9828 p>0,95	91,40 2,122
Частота обертання долота	$\overline{W}_{\Pi} = 1138{,}027 \cdot e^{1{,}562009 \cdot 10^{-3} \cdot n}$	0,9462 p>0,95	69,772 1,421
Коефіцієнт демпфування бурильного інструмента	$\overline{W}_{\Pi} = 1438{,}907 \cdot \beta^{0{,}01607438}$	0,8299 p>0,8	11,479 1,114
Жорсткість бурильного інструмента	$\overline{W}_{\Pi} = 1428{,}707 + 60395.76 / C$	-0,1934 p<0,5	- 1,138

Таблиця 5 – Результати підбору частинних емпіричних залежностей

Змінний фактор	Частинні емпіричні залежності за скоригованими даними (методика Протодьяконова (МП))	Емпіричне значення коефіцієнта кореляції	Середнє квадратичне відхилення
Осьове статичне навантаження	$W_{\Pi} = 1451{,}75 + 869{,}7911 / F_{CT}$	-0,198215 p<0,5	-
Частота обертання долота	$\overline{W}_{\Pi} = 1144{,}633 \cdot e^{1{,}555995 \cdot 10^{-3} \cdot n}$	0,9461 p>0,9	69,940
Коефіцієнт демпфування бурильного інструмента	$\overline{W}_{\Pi} = 1446{,}21 \cdot \beta^{0{,}0159989}$	0,8288 p>0,8	11,692
Жорсткість бурильного інструмента	$\overline{W}_{\Pi} = 1436{,}606 + 60323{,}19 / C$	-0,1922 p<0,5	-

Таблиця 6 – Результати підбору частинних емпіричних залежностей

Змінний фактор	Частинні емпіричні залежності за скоригованими даними (методика Яремійчука-Райхерта (МЯР))	Емпіричне значення коефіцієнта кореляції	Середнє квадратичне відхилення max/min
Частота обертання долота	$\overline{W}_{\Pi} = 354{,}788 \cdot n^{0{,}284655}$	0,9571 p>0,95	69,940
Коефіцієнт демпфування бурильного інструмента	$\overline{W}_{\Pi} = 1541{,}456 - 14{,}08653 / \beta$	0,3883 p<0,5	50,970
Жорсткість бурильного інструмента	$\overline{W}_{\Pi} = 1404{,}195 + 85995{,}53 / C$	-0,4779 p<0,5	63,078

Таблиця 7 – Результати підбору частинної залежності $\overline{W}_{П} = f(n)$

Вхідні дані	Частинні емпіричні залежності	Емпіричне значення коефіцієнта кореляції	Середнє квадратичне відхилення max/min
Експеримен-тальні дані	$\overline{W}_{П} = 1138{,}027 \cdot e^{1{,}562009 \cdot 10^{-3} \cdot n}$	0,9462 p>0,95	69,772
Скор.дані (ск.1) F≈const МП	$\overline{W}_{П} = 1145{,}027 \cdot e^{1{,}553787 \cdot 10^{-3} \cdot n}$	0,9462 p>0,9	69,940
Скор.дані (ск.2) F≈const МЯР	$\overline{W}_{П} = 354{,}788 \cdot n^{0{,}284655}$	0,9571 p>0,95	68,341

Таблиця 8 – Результати підбору частинних емпіричних залежностей

Змінний фактор	Частинні емпіричні залежності за скоригованими даними (методика Протодьяконова)	Емпіричне значення коефіцієнта кореляції	Середнє квадратичне відхилення max/min
Коефіцієнт демпфування бурильного інструмента	$\overline{W}_{П.СК.3} = 1601{,}29 - 14{,}14509 / \beta$	0,3955 p<0,5	50,425
Жорсткість бурильного інструмента	$\overline{W}_{П.СК.3} = 1463{,}833 + 86037{,}88 / C$	-0,4818 p<0,5	62,795

Таблиця 9 – Результати підбору частинних емпіричних залежностей

Змінний фактор	Частинні емпіричні залежності за скоригованими даними (методика Яремійчука-Райхерта)	Емпіричне значення коефіцієнта кореляції	Середнє квадратичне відхилення max/min
Коефіцієнт демпфування бурильного інструмента	$\overline{W}_{П.СК.4} = 1594{,}074 - 11{,}44699 / \beta$	0,2295 p<0,5	58,431
Жорсткість бурильного інструмента	$\overline{W}_{П.СК.4} = 1465{,}887 + 83933{,}96 / C$	-0,3976 p<0,5	70,36

Для підсилення впливу параметрів бурового інструменту на енергоємність проводимо нейтралізацію другого за впливом на зміну енергоємності змінного фактора. Таким фактором є частота обертання долота. Під час зміни частоти з 82 до 285хв$^{-1}$ енергоємність зменшилась у 1,421 рази (див. табл.4). При цьому ймовірність існування кореляційної залежності за криволінійною регресією є більшою за 0,95 (див. табл. 7).

За методикою Протодяконова усі скоректовані дані $\overline{W}_{П.СК.2.i}$ перераховуються за формулою

$$\overline{W}_{П.СК.3.i} = \overline{W}_{П.СК.2.i} + [f(n_{CP}) - f(n_i)], \quad (5)$$

де $f(n_{CP})$ – значення енергоємності, визначене за формулою $\overline{W}_{П} = 354{,}788 \cdot n^{0{,}284655}$ та за середнім значенням n=183,5хв$^{-1}$;

$f(n_i)$ – значення енергоємності, визначені за формулою $\overline{W}_{П} = 354{,}788 \cdot n^{0{,}284655}$ та за значеннями n =82, 133, 188 і 285хв$^{-1}$.

За методикою Яремійчука-Райхерта усі скориговані дані $\overline{W}_{П.СК.2.i}$ перераховуються за формулою

$$\overline{W}_{П.СК.4.i} = \overline{W}_{П.СК.2.i} \frac{f(n_{CP})}{f(n_i)}. \quad (6)$$

Результати підбору частинних емпіричних залежностей між змінними факторами та енергоємністю процесу руйнування гірської породи за скоректованими даними, одержаними при нейтралізації впливу частоти обертання за методикою Протодьяконова, наведено у таблиці 8, а за методикою Яремійчука-Райхерта – у таблиці 9.

Таблиця 10 – Результати підбору частинної залежності T=f(C) методом найменших квадратів

Вхідні дані	Частинні емпіричні залежності	Емпіричне значення коефіцієнта кореляції	Середнє квадратичне відхилення max/min
Експ. дані	$W_{П} = 1428{,}707 + 60395.76 / C$	-0,1934 p<0,5	- 1,138
Скор. дані (ск.1) F≈const МП	$\overline{W}_{П.СК.1} = 1436{,}606 + 60323{,}19 / C$	-0,1922 p<0,5	- 1,137
Скор. дані F≈const (ск.2) МЯР	$\overline{W}_{П.СК.2} = 1404{,}195 + 85995{,}53 / C$	-0,4779 p<0,5	63,078 1,180
Скор. дані (ск.3) F≈const (ск.2) МЯР; n≈const МП	$\overline{W}_{П.СК.3} = 1463{,}833 + 86037{,}88 / C$	-0,4818 p<0,5	62,795 1,172
Скор. дані (ск.4) F≈const (ск.2) МЯР; n≈const МЯР	$\overline{W}_{П.СК.4} = 1465{,}887 + 83933{,}96 / C$	-0,3976 p<0,5	70,36 1,171

Таблиця 11 – Результати підбору частинної залежності T=f(C) поліномом другого ступеня

Вхідні дані	Частинні емпіричні залежності	Емпіричне значення коефіцієнта кореляції	Середнє квадратичне відхилення max/min
Експ. дані	$\overline{W}_{П} = 1766{,}4345 - 0{,}5049794 \cdot C + 1{,}672 \cdot 10^{-4} \cdot C^2$	0,6548 p<0,8	32,78352 1,138
Скор. дані (ск.1) F≈const МП	$\overline{W}_{П.СК.1} = 1773{,}7904 - 0{,}5052551 \cdot C + 1{,}674 \cdot 10^{-4} \cdot C^2$	0,6532 p<0,8	32,760 1,137
Скор. дані F≈const (ск.2) МЯР	$\overline{W}_{П.СК.2} = 1826{,}9796 - 0{,}558493 \cdot C + 1{,}743 \cdot 10^{-4} \cdot C^2$	0,9925 p>0,95	8,157 1,180
Скор. дані (ск.3) F≈const (ск.2) МЯР; n≈const МП	$\overline{W}_{П.СК.3} = 1882{,}4883 - 0{,}5544368 \cdot C + 1{,}731 \cdot 10^{-4} \cdot C^2$	0,9923 p>0,95	8,201 1,172
Скор. дані (ск.4) F≈const (ск.2) МЯР; n≈const МЯР	$\overline{W}_{П.СК.4} = 1890{,}9913 - 0{,}5810202 \cdot C + 1{,}846 \cdot 10^{-4} \cdot C^2$	0,7080 p<0,8	19,154 1,171

Таблиця 10 містить результати підбору частинних залежностей $\overline{W}_{П} = f(n)$ за експериментальними та скоректованими даними (див. табл. 4…6, 8, 9).

Як свідчить таблиця 10, жодна із 14-ти емпіричних залежностей із задовільною точністю не апроксимує експериментальні та скоректовані дані. З метою встановлення такої залежності проводимо вирівнювання експериментальних даних поліномом другого ступеня. Результати цього підбору наведено у таблиці 11.

За скоригованими даними (ск.2), одержаними при нейтралізації впливу осьового навантаження за методикою Яремійчука-Райхерта, відношення між максимумом і мінімумом енергоємності найбільше, а основна похибка найменша, тобто згідно таблицями 10 і 11) кращою частинною емпіричною залежністю між жорст-

Таблиця 12 – Результати підбору частинної залежності T=f(β) методом найменших квадратів

Вхідні дані	Частинні емпіричні залежності	Емпіричне значення коефіцієнта кореляції	Середнє квадратичне відхилення max/min
Експ. дані	$\overline{W}_{П} = 1438{,}907 \cdot \beta^{0{,}01607438}$	0,8299 p>0,8	14,479 1,114
Скор.дані (ск.1) F≈const МП	$\overline{W}_{П.СК.1} = 1446{,}21 \cdot \beta^{0{,}0159989}$	0,8288 p>0,8	14,692 1,114
Скор. дані F≈const (ск.2) МЯР	$\overline{W}_{П.СК.2} = 1541{,}456 - 14{,}08653 / \beta$	0,3883 p<0,5	50,970 1,151
Скор. дані (ск.3) F≈const (ск.2) МЯР; n≈const МП	$\overline{W}_{П.СК.3} = 1601{,}29 - 14{,}14509 / \beta$	0,3955 p<0,5	50,425 1,145
Скор. дані (ск.4) F≈const (ск.2) МЯР; n≈const МЯР	$\overline{W}_{П.СК.4} = 1594{,}074 - 11{,}44699 / \beta$	0,2295 p<0,5	58,431 1,132
Скор. дані (ск.5) F≈const (ск.2) МЯР; C≈const МП	$\overline{W}_{П.СК.5} = 1419{,}456 - 14{,}08652 / \beta$	0,3883 p<0,5	50,967 1,165
Скор. дані (ск.6) F≈const (ск.2) МЯР; C≈const МЯР	$\overline{W}_{П.СК.6} = 1414{,}424 - 12{,}23298 / \beta$	0,3036 p<0,5	52,900 1,15

кістю та енергоємністю процесу руйнування породи є поліном другого ступеня виду $\overline{W}_{П} = 1826{,}9796 - 0{,}558493 \cdot C + 1{,}743 \cdot 10^{-4} \cdot C^2$. Ймовірність існування кореляційної залежності за цим поліномом більша 0,95.

За цим поліномом нейтралізуємо вплив третього за потужністю фактора зміни енергоємності – жорсткості бурильного інструменту. При зміні жорсткості з 400 до 1700 кН/м енергоємність зменшилась у 1,18 разів.

Результати підбору частинних емпіричних залежностей (за методом найменших квадратів) між коефіцієнтом демпфування бурильного інструменту та енергоємністю процесу руйнування гірської породи за експериментальними та скоригованими даними наведено у таблиці 12.

Підбір частинних залежностей T=f(β) методом найменших квадратів дав змогу з'ясувати, що апроксимація експериментальних та скоректованих даних має задовільну точність тільки у двох з восьми варіантів. Для збільшення варіантів підбору емпіричної кореляційної залежності проводимо вирівнювання експериментальних даних поліномом другого ступеня. Результати цього підбору наведено у таблиці 13.

Згідно з даними таблиць 12 і 13 кращою частинною залежністю T=f(β) є поліном другого ступеня, підібраний за експериментальними даними.

За поліномом $\overline{W}_{П} = 1387{,}3669 + 5{,}2206212 \cdot \beta - 4{,}06212 \cdot 10^{-2} \cdot \beta^2$ основна похибка апроксимації найменша, а значення емпіричного коефіцієнта кореляції найбільше. Ймовірність існування кореляційної залежності за цим поліномом перевищує 0,95.

Якщо кожна комбінація значень змінних факторів зустрічається тільки один раз, то загальну функцію можна подати добутком окремих функцій від змінних факторів – $\overline{W}_{П} = B_{CP} \cdot f(F_{CT}) \cdot f(n) \cdot f(\beta) \cdot f(C)$, де B_{CP} – усереднена за результатами експериментів стала, що залежить від типорозміру долота і механічних властивостей породи. Частинні залежності між кожним фактором та енергоємністю процесу руйнування породи подаємо у таблиці 14.

У таблиці 15 наведено значення коефіцієнта B, знайдені за формуло

$$B_i = \frac{\overline{W}_{П.i}}{f(F_i) \cdot f(n_i) \cdot f(\beta_i) \cdot f(C_i)}, \qquad (7)$$

Таблиця 13 – Результати підбору частинної залежності W=f(β) поліномом другого ступеня

Вхідні дані	Частинні емпіричні залежності	Емпіричне значення коефіцієнта кореляції	Середнє квадратичне відхилення max/min
Експ. дані	$\overline{W}_{П} = 1387{,}3669 + 5{,}2206212 \cdot \beta - 4{,}06212 \cdot 10^{-2} \cdot \beta^2$	0,9848	13,139 1,114
Скор.дані (ск.1) F≈const МП	$\overline{W}_{П.СК.1} = 1387{,}3697 + 5{,}2269748 \cdot \beta - 4{,}06977 \cdot 10^{-2} \cdot \beta^2$	0,9824	13,2 1,114
Скор. дані (ск.2) F≈const МЯР	$\overline{W}_{П.СК.2} = 1387{,}3697 + 5{,}2269748 \cdot \beta - 4{,}06977 \cdot 10^{-2} \cdot \beta^2$	0,7314	32,166 1,151
Скор. дані (ск.3) F≈const (ск.2) МЯР; n≈const МП	$\overline{W}_{П.СК.3} = 1466{,}1748 + 7{,}2613261 \cdot \beta - 7{,}2239 \cdot 10^{-2} \cdot \beta^2$	0,7154	32,524 1,145
Скор. дані (ск.4) F≈const (ск.2) МЯР; n≈const МЯР	$\overline{W}_{П.СК.4} = 1486{,}3323 + 6{,}7834059 \cdot \beta - 7{,}13314 \cdot 10^{-2} \cdot \beta^2$	0,6894	34,160 1,132
Скор. дані (ск.5) F≈const (ск.2) МЯР; C≈const МП	$\overline{W}_{П.СК.5} = 1284{,}843 + 7{,}2927089 \cdot \beta - 7{,}27666 \cdot 10^{-2} \cdot \beta^2$	0,7256	32,166 1,165
Скор. дані (ск.6) F≈const (ск.2) МЯР; C≈const МЯР	$\overline{W}_{П.СК.6} = 1297{,}5525 + 6{,}9053537 \cdot \beta - 7{,}10425 \cdot 10^{-2} \cdot \beta^2$	0,7945	28,394 1,15

де $\overline{W}_{П.i}$ – значення енергоємності за таблицею 1, яка відповідає і-тому досліду;

$f(F_{CT.i}) \cdot f(n_i) \cdot f(\beta_i) \cdot f(C_i)$ – добуток частинних емпіричних залежностей змінних факторів, величини яких відповідають умовам і-того досліду за таблицею 14.

Згідно з даними таблиці 15 середнє значення коефіцієнта В склало 626,237.

У таблиці 16 подаємо значення енергоємності, визначені за рівнянням багатофакторної математичної моделі

$$W_{П} = B_{CP} \cdot f(F_{CT}) \cdot f(n) \cdot f(\beta) \cdot f(C) = 626{,}237 \cdot e^{-1{,}503553 \cdot 10^{-3} \cdot F_{CT}^2} \cdot n^{0{,}284655} \times (1 + 3{,}7665635 \cdot 10^{-3} \cdot \beta - 2{,}9313621 \cdot 10^{-5} \cdot \beta^2) \times (1 - 3{,}05692 \cdot 10^{-4} \cdot C + 9{,}54034 \cdot 10^{-8} \cdot C^2), \quad (8)$$

та величини відносної похибки (ВП) між цими значеннями і експериментальними даними дослідів.

Мінімальне відхилення значень енергоємності, знайдених за формулою (8), від експериментальних склало 0,05%, а максимальне – 13,1%. Середнє відхилення обчислених значень енергоємності від експериментальних – 5,7%.

Просторові залежності енергоємності процесу руйнування породи від осьового статичного навантаження та частоти обертання долота, зображені на рисунках 1 і 2, а від жорсткості та коефіцієнта демпфування бурильного інструменту – на рисунках 3 і 4.

Одержані просторові графіки свідчать, що збільшенням осьового навантаження енергоємність руйнування гірської породи зменшується, а з ростом частоти обертання – збільшується.

Як свідчать рисунки 3 і 4, графіками залежностей $\overline{W}_{П} = f(\beta, C)$ є параболічними гіперболоїдами, які мають мінімакси. Оскільки вплив коефіцієнта демпфування β на енергоємність процесу поглиблення свердловини є відчутно меншим порівняно із впливом жорсткості C, то достатньо знайти у кожному конкретному випадку значення мінімакса, який і визначатиме рекомендовану жорсткість бурильного інструменту (для досліджуваних умов вона склала 1602кН/м). З метою обґрунтування цієї пропозиції знаходимо енергоємність (див. таблицю 14) на чотирьох рівнях осьового статичного навантаження за двох значень (мінімального та максимального) частоти обертання.

Таблиця 14 – Частинні емпіричні залежності $f(F_{CT.i}) \cdot f(n_i) \cdot f(\beta_i) \cdot f(C_i)$ багатофакторної математичної моделі

$F_{СТ}$, кН	10	15	20	25
Експериментальні значення $W_{П.i}$	2075	1772	1176	978
$W_{П} = 2381{,}986 \cdot e^{-1{,}503553 \cdot 10^{-3} \cdot F_{CT}^2}$	2049	1698	1305	931
$e^{-1{,}503553 \cdot 10^{-3} \cdot F_{CT}^2}$	**0,8604**	**0,7130**	**0,5480**	**0,3907**
$n_{ДОЛ}$, хв$^{-1}$	82	133	188	285
Скоректовані значення $W_{П.СК.2}$	1231	1498	1488	1808
$W_{П} = 354{,}788 \cdot n^{0{,}284655}$	1244	1427	1575	1773
$n^{0{,}284655}$	**3,5057**	**4,02314**	**4,4397**	**4,9979**
β, кН·с/м	0,1	40	70	90
Експериментальні значення $W_{П.i}$	1385	1543	1537	1536
$\overline{W}_{П} = 1387{,}3669 + 5{,}2296212 \cdot \beta - 4{,}06212 \cdot 10^{-2} \cdot \beta^2$	1388	1531	1554	1528
$1 + 3{,}7665635 \cdot 10^{-3} \cdot \beta - 2{,}9313621 \cdot 10^{-5} \cdot \beta^2$	**1,00038**	**1,10376**	**1,12002**	**1,10155**
С, кН/м	400	800	1700	2500
Скоректовані значення $W_{П.СК.2}$	1636	1481	1388	1518
$\overline{W}_{П} = 1826{,}9796 - 0{,}558493 \cdot C + 1{,}743 \cdot 10^{-4} \cdot C^2$	1631	1492	1381	1520
$1 - 3{,}05692 \cdot 10^{-4} \cdot C + 9{,}54034 \cdot 10^{-8} \cdot C^2$	**0,89299**	**0,81650**	**0,75604**	**0,83204**

Таблиця 15 – Значення коефіцієнта В за експериментальними даними планового експерименту

№ експ.	1	2	3	4	5	6	7	8
В	695,477	686,551	553,859	605,774	639,507	670,547	609,746	685,606
№ експ.	9	10	11	12	13	14	15	16
В	625,849	594,829	559,67	602,924	608,88	631,896	594,265	664,016

Таблиця 16 – Результати досліджень за спланованим чотирифакторним експериментом та значення енергоємності за рівнянням математичної моделі

№ досл.	n	$F_{СТ}$	С	β	$\overline{W}_{П.i}$, Н·м/см^3	$\overline{W}_{П.i}$, Н·м/см^3 за рівнянням (8)	Похибка в %
338	82	10	400	0,1	1874	1687	10,0
339	82	15	2500	40	1576	1438	8,8
340	82	20	800	70	901	1019	-13,1
341	82	25	1700	90	691	714	-3,3
342	133	10	800	90	1991	1950	2,1
343	133	15	1700	70	1759	1643	6,6
344	133	20	400	40	1325	1361	-2,7
345	133	25	2500	0,1	897	819	8,7
346	188	10	1700	40	1995	1996	-0,05
347	188	15	800	0,1	1538	1619	-5,3
348	188	20	2500	90	1248	1396	-11,6
349	188	25	400	70	1046	1086	-3,8
350	285	10	2500	70	2440	2510	-2,9
351	285	15	400	90	2215	2195	0,9
352	285	20	1700	0,1	1231	1297	-5,4
353	285	25	800	40	1278	1205	5,7

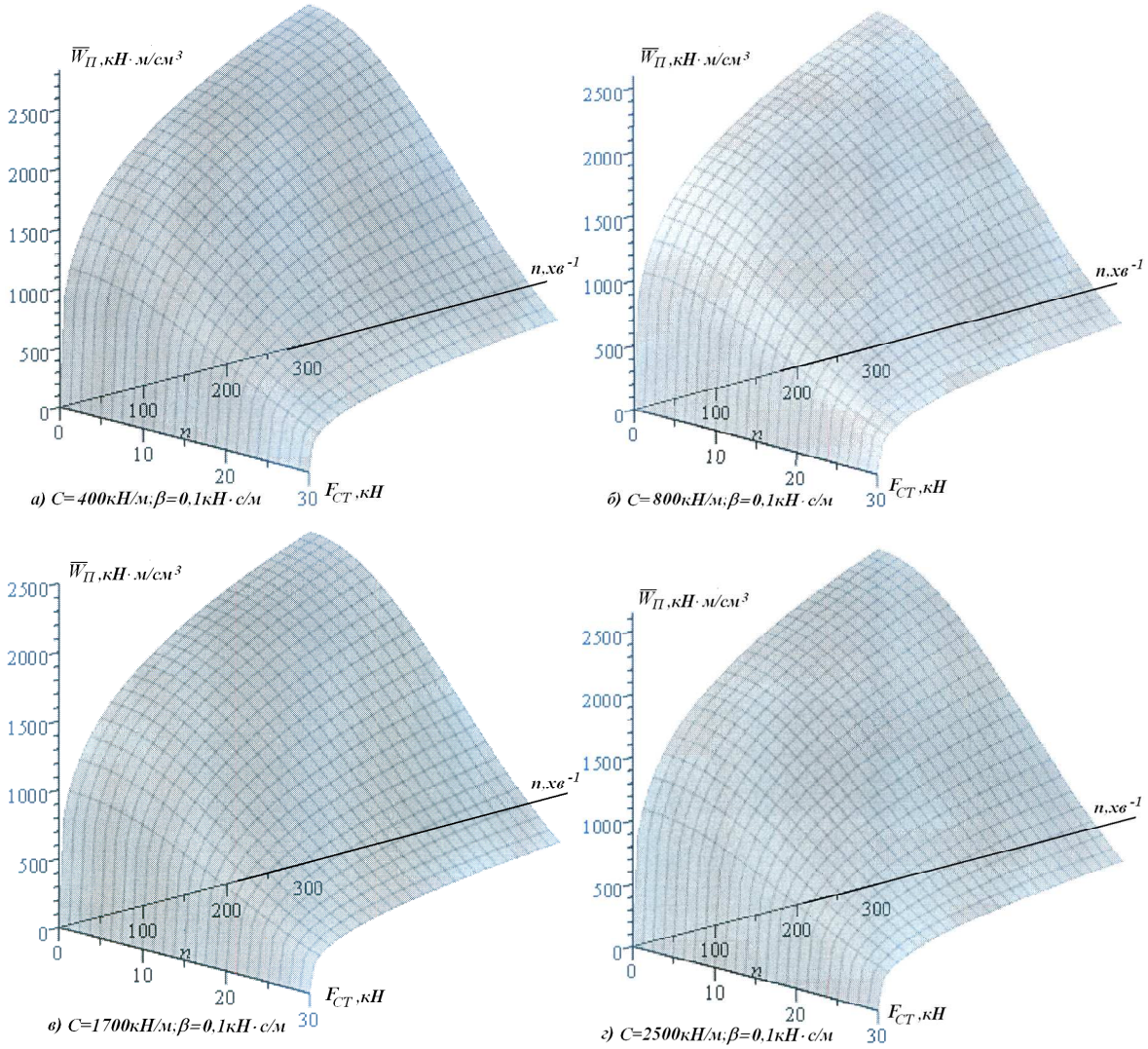


Рисунок 1 – Графіки залежності $\overline{W}_П = f(F_{СТ}, n)$ за постійного коефіцієнта демпфування та змінної жорсткості бурильного інструменту

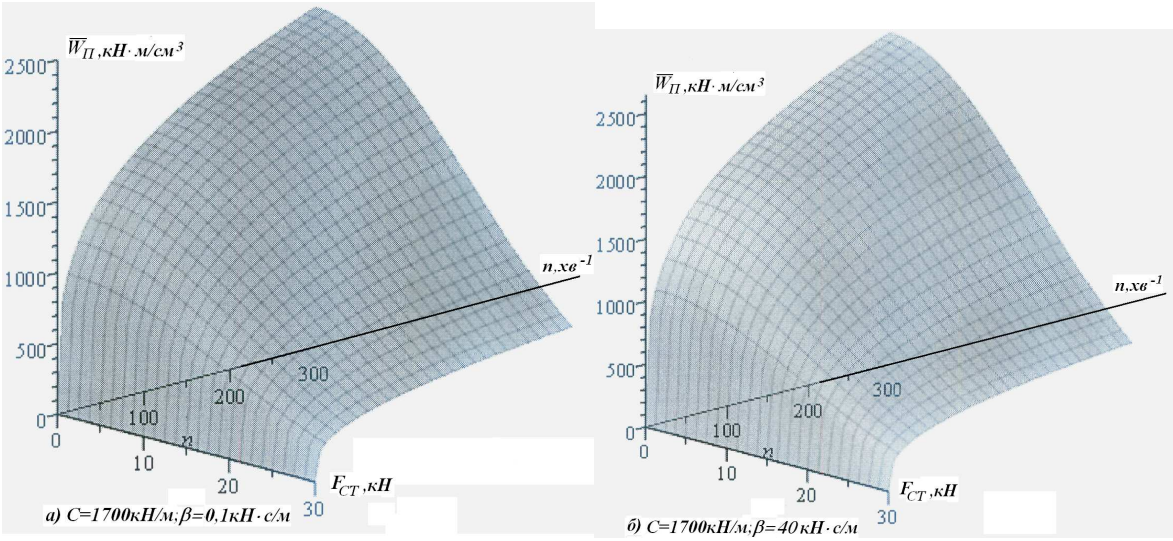


Рисунок 2 – Графіки залежності $\overline{W}_П = f(F_{СТ}, n)$ за постійної жорсткості та змінного значення коефіцієнта демпфування бурильного інструменту

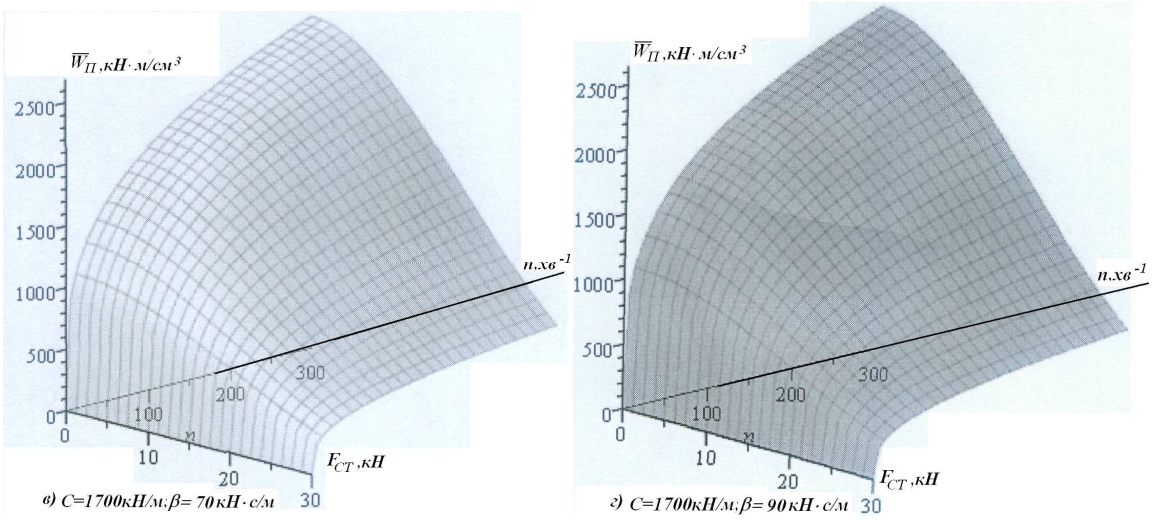


Рисунок 2 – Графіки залежності $\overline{W}_П = f(F_{CT}, n)$ за постійної жорсткості та змінного значення коефіцієнта демпфування бурильного інструменту (продовження)

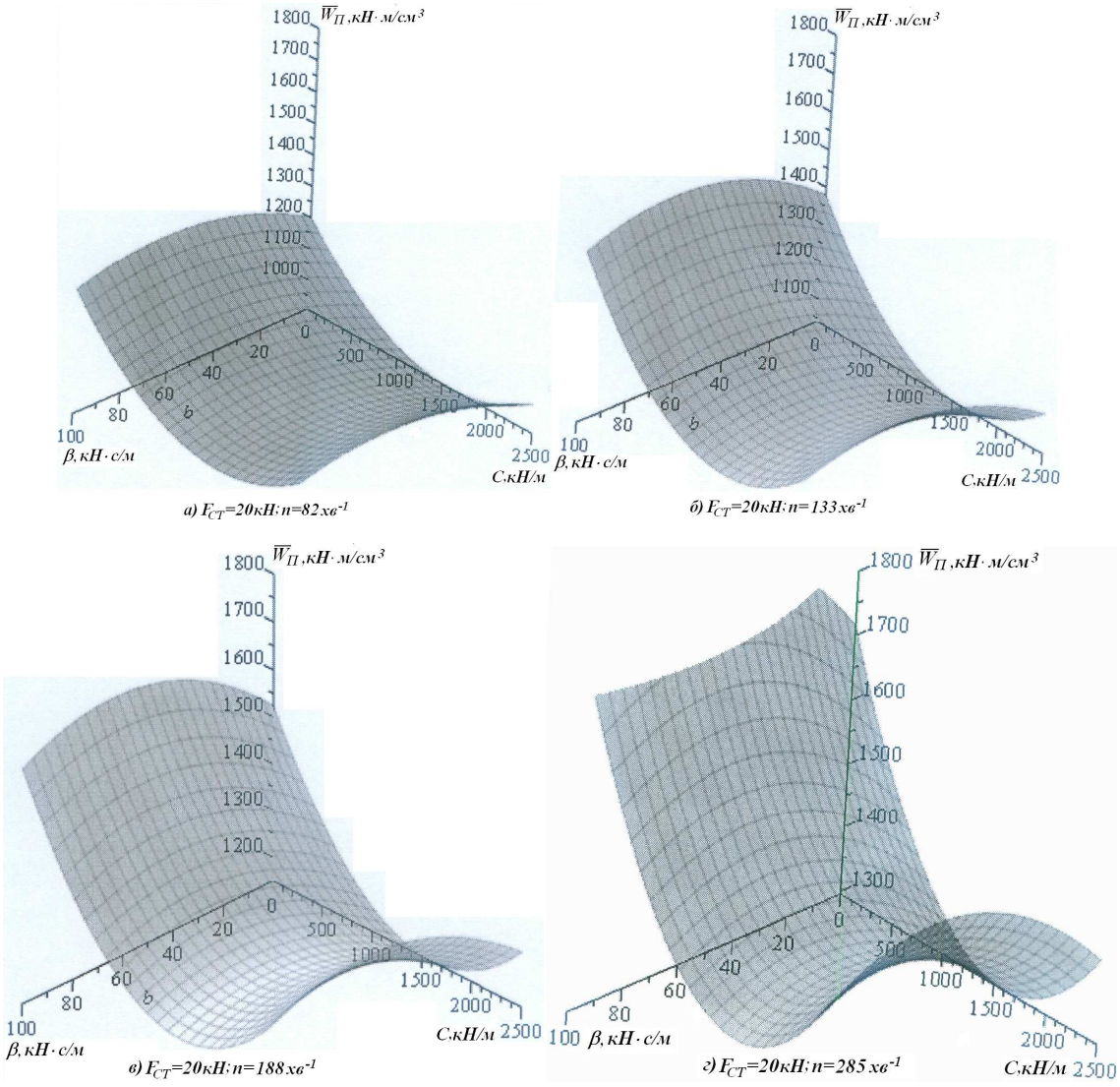


Рисунок 3 – Графіки залежності $\overline{W}_П = f(C, \beta)$ за постійного статичного навантаження та змінної частоти обертання долота

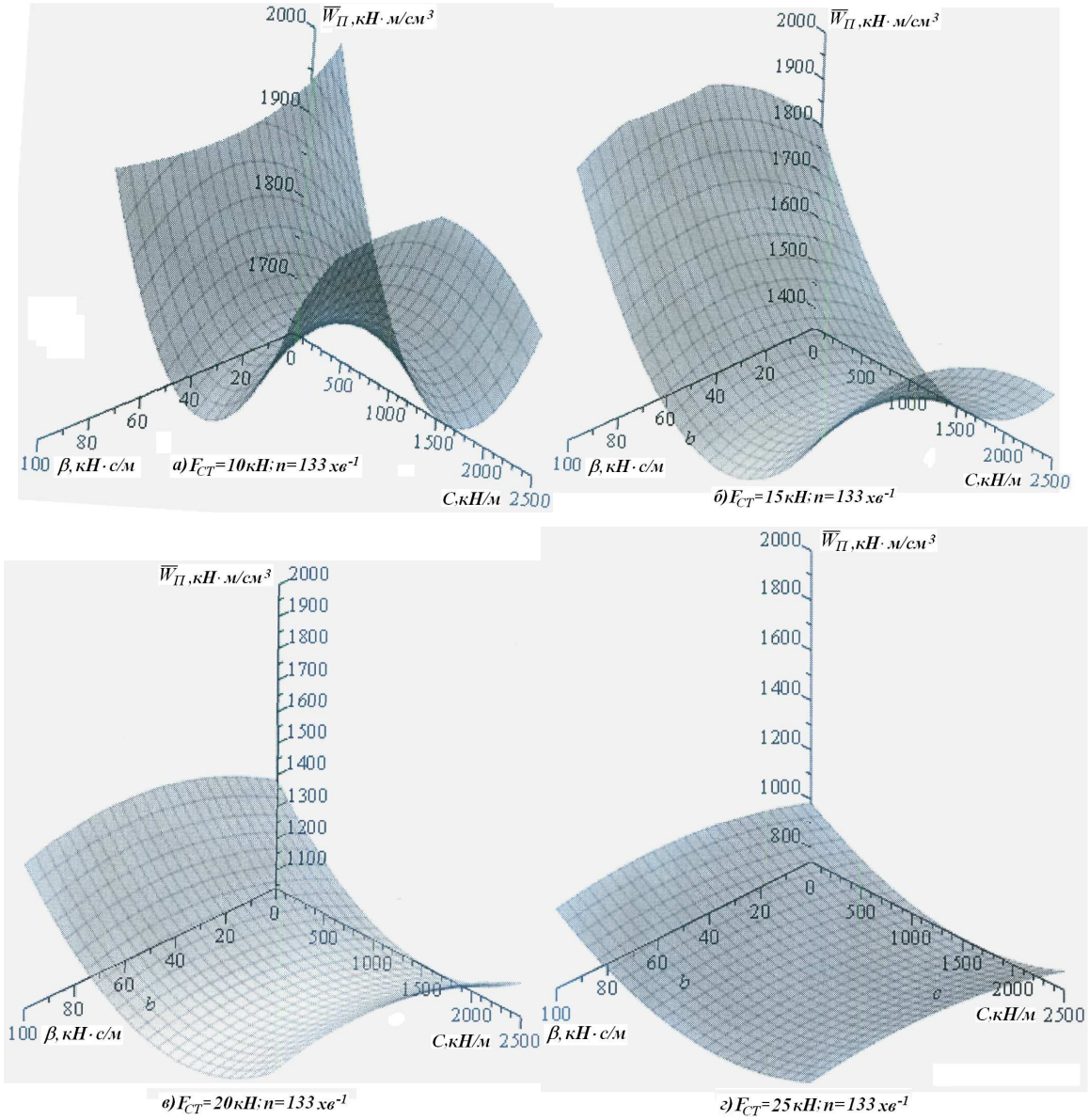


Рисунок 4 – Графіки залежності $\overline{W}_П = f(C,\beta)$ за постійної частоти обертання долота та змінного статичного навантаження на вибій

Згідно розрахунків різниця між значеннями енергоємності, одержаними за β_{min} та β_{max}, знаходиться в межах похибки між експериментальними значеннями та значеннями, визначеними за рівнянням моделі (10,7<13,1), а різниця між значеннями енергоємності, одержаними за C_{min} та C_{max}, виходить за межі похибки (15,4>13,1). Враховуючи зазначене, визначення мінімуму енергоємності процесу руйнування гірської породи доцільно проводити за трьома параметрами: осьовим статичним навантаженням на вибій, частотою обертання долота та жорсткістю бурильного інструменту.

Висновки:

1. Методом раціонального планування експерименту встановлено багатофакторну математичну модель, що пов'язує енергоємність процесу руйнування породи з основними режимними параметрами процесу буріння (осьовим статичним навантаженням на вибій і частотою обертання долота) і параметрами компоновки бурильного інструменту (жорсткостю і коефіцієнтом демпфування). Ця модель має вигляд

$$\overline{W}_П = 626{,}237 \cdot e^{-1{,}50355310^{-3} \cdot F_{CT}^2} \cdot n^{0{,}284655} \times$$
$$\times (1 + 3{,}7665635 \cdot 10^{-3} \cdot \beta - 2{,}9313621 \cdot 10^{-5} \cdot \beta^2) \times$$
$$\times (1 - 3{,}05692 \cdot 10^{-4} \cdot C + 9{,}54034 \cdot 10^{-8} \cdot C^2) .$$

Максимальне значення відносної похибки при використанні математичної моделі склало 13,1%, а її середнє значення – 5,7%.

2. Графіки залежностей енергоємності процесу руйнування гірської породи від параметрів C, β бурильного інструменту мають вигляд параболічних гіперболоїдів і характеризуються наявністю мінімаксів.

3. Оскільки різниця між значеннями енергоємності, одержаними за β_{min} та $\beta_{мах}$, знаходиться в межах похибки між експериментальними значеннями та значеннями, визначеними за рівнянням моделі (10,7<13,1), а різниця між значеннями енергоємності, одержаними за C_{min} та $C_{мах}$, виходить за межі похибки (15,4>13,1), то визначення мінімуму енергоємності $\overline{W_П}$ доцільно проводити за трьома параметрами: осьовим статичним навантаженням на вибій F_{CT}, частотою обертання долота n та жорсткістю бурильного інструменту C.

Література

1 Протодьяконов М.М. Методика рационального планирования эксперимента [Текст] / М.М.Протодяконов. – М.: Наука, 1970. – 76 с.

2 Беликов В.Г. Рациональная отработка и изностойкость шарошечных долот [Текст] / В.Г.Беликов, С.А.Посташ. – М.: Недра, 1972. – 149 с.

3 Григорян Н.А. Анализ процесса турбинного бурения [Текст] / Н.А.Григорян, Р.Е.Багиров. – М.: Недра, 1982. – 207 с.

4 Потапов Ю.Ф. Разрушение горных пород трехшарошечными долотами малого диаметра / Ю.Ф.Потапов. – М.: Гостоптехиздат, 1961. – 86 с.

5 Яремийчук Р.С. Бурение стволов большого диаметра [Текст] / Р.С.Яремийчук, Л.А.Райхерт. – М.: Недра, 1966. – 174 с.

6 Буровий стенд для дослідження процесу руйнування гірських порід і динаміки бурильного інструменту / Б.Д.Борисевич, В.М.Мойсишин, Р.Б.Щербій, Б.В.Долішній // Розвідка та розробка нафтових та газових родовищ. – 2009. – №3(32). – С. 23-29.

7 Пристрої зміни динаміки буріння на буровому стенді ІФНТУНГ / Б.Д.Борисевич, В.М.Мойсишин, Р.Б.Щербій, Б.В.Долішній // Розвідка та розробка нафтових та газових родовищ. – 2009. – №4(33). – С. 18-23.

Стаття надійшла до редакційної колегії 27.02.13
Рекомендована до друку професором ***Коцкуличем Я.С.*** *(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)*
професором ***Гошовським С.В.*** *(УкрНДГРІ, м. Київ)*

УДК 517.958:622.276

МОДЕЛЮВАННЯ РОЗПОДІЛУ ТИСКУ В ГОРИЗОНТАЛЬНО-НЕОДНОРІДНИХ ОБМЕЖЕНИХ ПЛАСТАХ З УРАХУВАННЯМ РІЗНИХ ТИПІВ ГРАНИЧНИХ УМОВ ТА КІЛЬКОСТІ СВЕРДЛОВИН

Л.М. Журавчак, А.Є. Струк

Карпатське відділення Інституту геофізики ім. С. І. Субботіна НАН України,
79060, Львів, вул. Наукова 3б, e-mail: l z h u r a v c h a k @ u k r . n e t

Обґрунтовано ефективність використання непрямого методу пригранічних елементів для побудови розв'язку задачі про неусталений рух стисливої рідини в пружному пористому обмеженому кусково-однорідному пласті з урахуванням заданих дебіту або тиску на межі свердловин та гідронепроникності або тиску на зовнішній межі, а також ідеального контакту на межі поділу середовищ. З використанням фундаментального розв'язку нестаціонарного рівняння теплопровідності та схеми послідовності початкових умов побудовано дискретно-континуальну модель задачі з довільними початковими умовами та різними типами граничних умов першого та другого роду. Здійснено низку обчислювальних експериментів для оцінки впливу параметрів моделі на зміну пластового тиску.

Ключові слова: нестаціонарний процес зміни пластового тиску, непрямий метод пригранічних елементів, горизонтально-неоднорідний пласт.

Обоснована эффективность использования непрямого метода приграничных элементов для построения решения задачи о неустановившемся движении сжимаемой жидкости в упругом пористом ограниченном кусочно-однородном пласте с учетом заданных дебита или давления на границе скважин и гидроизоляции или давления на внешней границе, а также идеального контакта на границе раздела сред. С использованием фундаментального решения нестационарного уравнения теплопроводности и схемы последовательности начальных условий построена дискретно-континуальная модель задачи с произвольными начальными условиями и разными типами граничных условий первого и второго рода. Произведен ряд вычислительных экспериментов для оценки влияния параметров модели на изменение пластового давления.

Ключевые слова: нестационарный процесс изменения пластового давления, непрямой метод приграничных элементов, горизонтально-неоднородный пласт.

The article deals with the efficiency of an indirect near-boundary element technique used to solve the problem of unsettled compressible fluid motion in porous, elastic, closed piecewise-homogeneous reservoir, including given well production or pressure on the outer well and hydro-isolation or pressure border and also ideal contact at the media interface. Using the fundamental solution of the non-stationary thermal conductivity equation and sequence diagram of initial conditions, the problem's discrete-continual model with arbitrary initial and boundary conditions of the first and second type was created. Series of computational experiments to assess the influence of characteristics of environment on reservoir pressure change were carried out.

Key words: non-stationary process of reservoir pressure change, indirect near-boundary element technique, horizontal-heterogeneous reservoir.

Вступ

У нафтогазопромисловій геології найважливіше значення має неоднорідність нафтогазоносних пластів за фільтраційно-ємнісними властивостями, перш за все за проникністю, оскільки вона визначає співвідношення припливів нафти і газу до вибоїв свердловин, а отже, впливає на систему розробки покладу. Неоднорідність пласта зумовлює нерівномірність вироблення нафтових пластів і просування води під час експлуатації покладу та вивчається всією сукупністю геологічних, геофізичних і гідродинамічних методів. Першочергове значення для розпізнання неоднорідності має детальна попластова кореляція геологічно-геофізичних розрізів свердловин. Неоднорідність продуктивного пласта за його простяганням (т. зв. горизонтальна або зональна неоднорідність) проявляється в змінах товщини пластів, перерив частості колекторів і пов'язана з фаціальними заміщеннями і виклинюванням, чергуванням зон, складених пісковиками, алевролітами, аргілітами і глинами по всій площі покладу, літологічними властивостями порід.

Математичне моделювання процесу розробки нафтового родовища, змодельованого кусково-однорідним пористим пластом полягає у складанні й розв'язуванні системи диференціальних рівнянь у часткових похідних, яка його описує, доповненої початковими умовами (тими, що існували до початку розробки), крайовими умовами (на поверхнях, які обмежують пласт із зовнішніх сторін і на стінках свердловини всередині пласта) та умовами контакту між зонами, що мають різні, але постійні фізичні характеристики. Припустивши, що товщина пласта і її зміна є досить малими порівняно з розмірами пласта в горизонтальній площині вздовж осей x_1 і x_2, вертикальною складовою швидкості руху можна знехтувати і розв'язувати двовимірні рівняння руху для дуже протяжних пластів зі змінною товщиною $h(x_1, x_2)$ [1]. Основна поширена на сьогодні модель однорідного за параметрами необмеженого пласта не

завжди адекватно описує реальне середовище і процеси, що відбуваються в ньому при видобутку нафти і газу.

Для оцінки впливу зміни коефіцієнтів гідро- та п'єзопровідності різних зон необхідно розглядати модель кусково-однорідного пласта, яка враховує просторову зміну його структурно-фаціальних і літолого-фізичних характеристик. Водночас фізичні характеристики (коефіцієнти гідро- та п'єзопровідності) зони пласта поблизу стінки свердловини (привибійна зона пласта), як правило, відрізняється від характеристик решти пласта. Ця зміна зумовлена забрудненням (кольматацією) пор У процесі буріння свердловини (фільтратом і дисперсною фазою бурового розчину) і під час експлуатації (відкладами парафіну, мінеральних солей) або цілеспрямованим використанням методів інтенсифікації продуктивності свердловини (солянокислотне оброблення тощо). Для оцінки впливу такої зміни коефіцієнтів у привибійній зоні внаслідок кольматації чи інтенсифікації на тиск чи дебіт свердловини теж необхідно розглядати модель кусково-однорідного пласта.

Математична модель для знаходження тиску у кусково-однорідному пласті

Розглянемо еліптичний пласт $\Omega = \Omega_1 \cup \Omega_2 \cup \Gamma_{12}$ з півосями *a, b,* що містить концентричну свердловину радіусом R_c, навколо якої виділяється зона Ω_2 з фізичними характеристиками, що відмінні від характеристики решта пласта, а також з двома іншими свердловинами радіусом R_c, розміщеними в Ω_1 поблизу зовнішнього контура. Межа поділу зон $\Gamma_{12} = \Gamma_1 \cap \Gamma_2$ є колом з радіусом R_2 чи еліпсом з півосями a_2, b_2, де Γ_1, Γ_2 – межі областей Ω_1, Ω_2. Ця модель реалізує гіпотезу про кускову однорідність пласта як по площі, так і по вертикальному розрізу покладу.

Для розрахунку зміни тиску в часі у кожній точці областей Ω_m (m=1,2) для випадку пружного режиму розв'яжемо систему диференціальних рівнянь, що описують неусталений (нестаціонарний) рух пружної (стисливої) рідини в пружному пористому середовищі, змодельованому двовимірним кусково-однорідним пластом Ω з довільною криволінійною межею:

$$\mathbf{P}_{0\tau}^{(m)}(p^{(m)}(\mathbf{x},\tau)) = \frac{\partial^2 p^{(m)}(\mathbf{x},\tau)}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 p^{(m)}(\mathbf{x},\tau)}{\partial x_2^2} - \frac{1}{\kappa_m}\frac{\partial p^{(m)}(\mathbf{x},\tau)}{\partial \tau} = 0, (\mathbf{x},\tau) \in \Omega_m \times \mathbf{T}, m = 1,2 \quad (1)$$

Припустивши необхідність визначення зміни пластового тиску у замкненому покладі за умов ідеального контакту між зонами, отримаємо:

$$p^{(1)}(\mathbf{x},\tau) = p^{(2)}(\mathbf{x},\tau), (\mathbf{x},\tau) \in \Gamma_{12} \times \mathbf{T},$$
$$-\varepsilon_1 \frac{\partial p^{(1)}(\mathbf{x},\tau)}{\partial \mathbf{n}^{(1)}(\mathbf{x})} = -\varepsilon_2 \frac{\partial p^{(2)}(\mathbf{x},\tau)}{\partial \mathbf{n}^{(1)}(\mathbf{x})}, \quad (2)$$

граничних умов на зовнішньому контурі та на межах свердловин, розміщених в зонах Ω_2 та Ω_1:

$$p^{(1)}(\mathbf{x},\tau) = p_z^{(1)}(\mathbf{x},\tau) \text{ або}$$
$$-\varepsilon_1 \frac{\partial p^{(1)}(\mathbf{x},\tau)}{\partial \mathbf{n}^{(1)}(\mathbf{x})} = 0, (\mathbf{x},\tau) \in \Gamma_z^{(1)} \times \mathbf{T}, \quad (3)$$

$$p^{(1)}(\mathbf{x},\tau) = p_{cl}^{(1)}(\mathbf{x},\tau), (\mathbf{x},\tau) \in \Gamma_{cl}^{(1)} \times \mathbf{T}, \text{ або}$$
$$-\varepsilon_1 \frac{\partial p^{(1)}(\mathbf{x},\tau)}{\partial \mathbf{n}^{(1)}(\mathbf{x})} = q_{zl}^{(1)}(\mathbf{x},\tau), l=1,2, \quad (4)$$

$$p^{(2)}(\mathbf{x},\tau) = p_c^{(2)}(\mathbf{x},\tau), (\mathbf{x},\tau) \in \Gamma_c^{(2)} \times \mathbf{T} \text{ або}$$
$$-\varepsilon_2 \frac{\partial p^{(2)}(\mathbf{x},\tau)}{\partial \mathbf{n}^{(2)}(\mathbf{x})} = q_z^{(2)}(\mathbf{x},\tau), \quad (5)$$

і початкових умов

$$p^{(m)}(\mathbf{x},0) = p_0^{(m)}(\mathbf{x}), \mathbf{x} \in \Omega_m. \quad (6)$$

Тут $p^{(m)}(\mathbf{x},\tau)$ – тиск в області Ω_m;

$\varepsilon_m = k_m h / \mu_m$ – коефіцієнт гідропровідності породи в Ω_m;

$\kappa_m = k_m / (\mu_m \beta_m^*)$ – коефіцієнт п'єзопровідності;

k_m – коефіцієнт проникності;

μ_m – динамічний коефіцієнт в'язкості рідини;

β_m^* – коефіцієнт пружної ємності насиченого пласта в області Ω_m;

$\Gamma_{12} \cup \Gamma_z^{(1)} \cup_{l=1}^{2} \Gamma_{cl}^{(1)} = \Gamma_1$;

$\Gamma_{12} \cup \Gamma_c^{(2)} = \Gamma_2$;

$\mathbf{x} = (x_1, x_2)$ – декартові координати;

τ – час,

$\mathbf{T} = \{\tau : 0 < \tau < \infty\}$,

h – товщина пласта;

$p_0^{(m)}(\mathbf{x})$ – початковий пластовий тиск в області Ω_m;

$\mathbf{n}^{(m)}(\mathbf{x}) = (n_1^{(m)}(\mathbf{x}), n_2^{(m)}(\mathbf{x}))$ – однозначно визначена зовнішня нормаль до межі області Ω_m;

$$q_z^{(2)}(\mathbf{x},\tau) = \frac{q_c^{(2)}(\mathbf{x},\tau)}{2\pi R_c}; \; q_{lz}^{(1)}(\mathbf{x},\tau) = \frac{q_{cl}^{(1)}(\mathbf{x},\tau)}{2\pi R_c};$$

$q_{cl}^{(1)}(\mathbf{x},\tau)$, $q_c^{(2)}(\mathbf{x},\tau)$ – дебіт свердловин.

Побудова інтегральних зображень розв'язків початково-крайової задачі та граничних інтегральних рівнянь

Згідно з основними положеннями непрямого методу пригранічних елементів (НМПГЕ) [2] у зовнішніх пригранічних до Ω_m багатозв'язних областях $G_1 = G_{1z} \cup G_{12} \cup_{l=1}^{2} G_{1cl}$, $G_2 = G_{21} \cup G_{2c}$ введемо невідомі функції $\varphi^{(m)}(\mathbf{x},\tau)$, які описують розподіл невідомих

фіктивних джерел тиску. Після розширення області визначення функцій $p^{(m)}(\mathbf{x},\tau)$ на всю площину $\mathbf{R}^{2m}$, рівняння (1) перепишемо у вигляді

$$\mathbf{P}_{0\tau}^{(m)}(p^{(m)}(\mathbf{x},\tau)) = -\varphi^{(m)}(\mathbf{x},\tau)\chi_{Gm} - p_0^{(m)}(\mathbf{x})\delta(\tau),$$
$$(\mathbf{x},\tau)\in \mathbf{R}^{2m}\times\mathbf{T}, \quad (7)$$

де χ_{Gm} – характеристична функція області G_m, тобто $\chi_{Gm}=1$ при $\mathbf{x}\in G_m$, $\chi_{Gm}=0$ при $\mathbf{x}\notin G_m$,

$\delta(z)$ – дельта-функція Дірака.

Оскільки для оператора $\mathbf{P}_{0\tau}^{(m)}(p^{(m)}(\mathbf{x},\tau))$ існує й відомий фундаментальний розв'язок $U^{(m)}(\mathbf{x},\tau,\xi,\xi_4)$ [3], то інтегральне зображення розв'язку рівняння (7) та його похідних за нормалями з урахуванням початкового розподілу (6) мають вигляд

$$p^{(m)}(\mathbf{x},\tau) = \mathbf{F}_\tau^{(m)}(\mathbf{x},\tau,U^{(m)}) + b_\tau^{(m)}(\mathbf{x},\tau,U^{(m)}),$$
$$(\mathbf{x},\tau)\in \mathbf{R}^{2m}\times\mathbf{T}, \quad (8)$$

$$-\varepsilon_m \frac{\partial p^{(m)}(\mathbf{x},\tau)}{\partial \mathbf{n}^{(m)}(\mathbf{x})} = \mathbf{F}_\tau^{(m)}(\mathbf{x},\tau,Q^{(m)}) +$$
$$+ b_\tau^{(m)}(\mathbf{x},\tau,Q^{(m)}), (\mathbf{x},\tau)\in \Gamma_m\times\mathbf{T}, \quad (9)$$

$$-\varepsilon_2 \frac{\partial p^{(2)}(\mathbf{x},\tau)}{\partial \mathbf{n}^{(1)}(\mathbf{x})} = \mathbf{F}_\tau^{(2)}(\mathbf{x},\tau,Q^{(1,2)}) +$$
$$+ b_\tau^{(2)}(\mathbf{x},\tau,Q^{(1,2)}), (\mathbf{x},\tau)\in \Gamma_{12}\times\mathbf{T}, \quad (10)$$

де

$$\mathbf{F}_\tau^{(m)}(\mathbf{x},\tau,\Phi) = \int_0^\tau \int_{\Gamma_m} \Phi(\mathbf{x},\tau,\xi,\xi_4)\varphi^{(m)}(\xi,\xi_4)d\Gamma_m(\xi)d\xi_4,$$
$$\Phi\in\{U^{(m)},Q^{(m)},Q^{(1,2)}\}, \quad (11)$$

$$b_\tau^{(m)}(\mathbf{x},\tau,\Phi) = \int_{\Omega_{m0}} \Phi(\mathbf{x},\tau,\xi,0)p_0^{(m)}(\xi)d\Omega_{m0}(\xi), \quad (12)$$

$$U^{(m)}(\mathbf{x},\tau,\xi,\xi_4) = \frac{1}{4\pi\kappa_m(\tau-\xi_4)} exp(-\frac{r^2}{4\kappa_m(\tau-\xi_4)}),$$
$$\xi=(\xi_1,\xi_2)\in\mathbf{R}^2,\ \xi_4\in T,$$
$$Q^{(m)}(\mathbf{x},\tau,\xi,\xi_4) = \varepsilon_m\sum_{l=1}^{2} Q_l^{(m)}(\mathbf{x},\tau,\xi,\xi_4)\mathbf{n}_l^{(m)}(\mathbf{x})$$
$$r^2 = \sum_{i=1}^{2} y_i^2, y_i = x_i-\xi_i,$$
$$Q_l^{(m)}(\mathbf{x},\tau,\xi,\xi_4) = -\frac{\partial U^{(m)}(\mathbf{x},\tau,\xi,\xi_4)}{\partial x_l} =$$
$$= \frac{U^{(m)}(\mathbf{x},\tau,\xi,\xi_4)y_l}{2\kappa_m(\tau-\xi_4)} = \frac{exp(-\frac{r^2}{4\kappa_m(\tau-\xi_4)})y_l}{8\pi\kappa_m^2(\tau-\xi_4)^2},$$
$$Q^{(1,2)}(\mathbf{x},\tau,\xi,\xi_4) = \varepsilon_2\sum_{l=1}^{2} Q_l^{(2)}(\mathbf{x},\tau,\xi,\xi_4)\mathbf{n}_l^{(1)}(\mathbf{x}),$$

$\Omega_{m0} = \Omega_m \cup \Omega_{mp}$, Ω_{mp} – багатозв'язна область продовженої початкової умови [2], в якій початковий тиск лінійно спадає від значення на межі Γ_m до нульового. Зауважимо, що Ω_{mp} та G_m не повинні співпадати, хоч і можуть.

Спрямувавши в (8)-(10) x зсередини областей Ω_m до меж Γ_m для задоволення умов (2)-(5), одержимо граничні інтегральні рівняння (ГІР), які зв'язують невідомі $\varphi_m(\xi,\xi_4)$ з відомими $p_0^{(m)}(\xi)$ та заданими на контурі свердловин функціями

$$\mathbf{F}_\tau^{(1)}(\mathbf{x},\tau,U^{(1)}) - \mathbf{F}_\tau^{(2)}(\mathbf{x},\tau,U^{(2)}) = b_\tau^{(2)}(\mathbf{x},\tau,U^{(2)}) -$$
$$- b_\tau^{(1)}(\mathbf{x},\tau,U^{(1)}, (\mathbf{x},\tau)\in \Gamma_{12}\times\mathbf{T}, \quad (13)$$

$$\mathbf{F}_\tau^{(1)}(\mathbf{x},\tau,Q^{(1)}) - \mathbf{F}_\tau^{(2)}(\mathbf{x},\tau,Q^{(1,2)}) = b_\tau^{(2)}(\mathbf{x},\tau,Q^{(1,2)}) -$$
$$- b_\tau^{(1)}(\mathbf{x},\tau,Q^{(1)}), (\mathbf{x},\tau)\in \Gamma_{12}\times\mathbf{T}, \quad (14)$$

$$\mathbf{F}_\tau^{(1)}(\mathbf{x},\tau,U^{(1)}) = p_z^{(1)}(\mathbf{x},\tau) - b_\tau^{(1)}(\mathbf{x},\tau,U^{(1)})$$
або $\mathbf{F}_\tau^{(1)}(\mathbf{x},\tau,Q^{(1)}) = -b_\tau^{(1)}(\mathbf{x},\tau,Q^{(1)}),$
$$(\mathbf{x},\tau)\in \Gamma_z^{(1)}\times\mathbf{T}, \quad (15)$$

$$\mathbf{F}_\tau^{(1)}(\mathbf{x},\tau,U^{(1)}) = p_{cl}^{(1)}(\mathbf{x},\tau) - b_\tau^{(1)}(\mathbf{x},\tau,U^{(1)})$$ або
$$\mathbf{F}_\tau^{(1)}(\mathbf{x},\tau,Q^{(1)}) = q_{zl}^{(1)}(\mathbf{x},\tau) - b_\tau^{(1)}(\mathbf{x},\tau,Q^{(1)}),$$
$$(\mathbf{x},\tau)\in \Gamma_{cl}^{(1)}\times\mathbf{T}, \quad (16)$$

$$\mathbf{F}_\tau^{(2)}(\mathbf{x},\tau,U^{(2)}) = p_c^{(2)}(\mathbf{x},\tau) - b_\tau^{(2)}(\mathbf{x},\tau,U^{(2)})$$
або
$$\mathbf{F}_\tau^{(2)}(\mathbf{x},\tau,Q^{(2)}) = q_z^{(2)}(\mathbf{x},\tau) - b_\tau^{(2)}(\mathbf{x},\tau,Q^{(2)}),$$
$$(\mathbf{x},\tau)\in \Gamma_c^{(2)}\times\mathbf{T}. \quad (17)$$

Просторово-часова дискретизація математичної моделі

Оскільки виконати аналітичне інтегрування у рівняннях (13)-(17) для прикладних задач внаслідок довільності області Ω практично неможливо, здійснимо просторово-часову дискретизацію за допомогою таких кроків. Межі Γ_m та області G_m дискретизовано відповідно на V_m граничних $\Gamma_{m\nu}$ та приграничних $G_{m\nu}$ елементів, причому ділянки, що належать зовнішньому контуру, на V_{1z}, контури свердловин – на V_{1lc}, V_{2c}, межу поділу середовищ – на V_{12}, тобто

$$\cup_{\nu=1}^{V_m}\Gamma_{m\nu} = \Gamma_m,\ \cup_{\nu=1}^{V_{1z}}\Gamma_{1\nu} = \Gamma_z^{(1)},$$
$$\cup_{\nu=V_{1z}+1}^{V_{1z}+V_{12}}\Gamma_{1\nu} = \cup_{\nu=1}^{V_{12}}\Gamma_{2\nu} = \Gamma_{12},$$
$$\cup_{\nu=V_{1z}+V_{12}+1}^{V_1}\Gamma_{1\nu} = \Gamma_{c1}^{(1)}\cup\Gamma_{c2}^{(1)}$$
$$\cup_{\nu=V_{12}+1}^{V_2}\Gamma_{2\nu} = \Gamma_c^{(2)},$$
$$V_1 = V_{1z}+V_{12}+V_{11c}+V_{12c},\ V_2 = V_{12}+V_{2c},$$

граничні елементи між собою не перетинаються. Тоді невідомі функції, які описують розподіл фіктивних джерел тиску в межах пригранічних елементів G_{mv}, позначимо через $\varphi_v^{(m)}(\mathbf{x},\tau)$. Області Ω_m та Ω_{mp} дискретизуємо на криволінійні елементи другого порядку з 8-ми вузлами Ω_{mq} $(q=1,...,Q_m)$, Ω_{mpq} $(q=1,...,Q_{mp})$ [4].

Для зручності опису залежності функцій $\varphi_v^{(m)}(\mathbf{x},\tau)$ від часу часовий промінь **T** розбито на інтервали $\mathbf{T}_k=[\tau_{k-1}, \tau_k]$ (k=1,2,...,τ_0=0) і в межах кожного $\mathbf{T}_k$ (k=1,...,K, K>1) ці функції апроксимовано постійними d_v^{mk}. Дискретно-континуальну модель побудовано для покрокової часової схеми – схеми послідовності початкових умов (СППУ) [2, 5].

Кожен крок за часом $\mathbf{T_k}$ розглянуто як нову задачу, тобто уведено локальний час $\tilde{\tau}=\tau-\sum_{p=1}^{k-1}\Delta\tau_p$ ($\Delta\tau_k$ – величина часового приросту на k-му кроці) і обчислені в кінці (k-1)-го часового інтервалу значення $p^{(m)}(\mathbf{x},\Delta\tau_{k-1})$ у внутрішніх точках використано як початкові для наступного k-го кроку.

Оператори $\mathbf{F}_\tau^{(m)}(\mathbf{x},\tau,\Phi^{(m)})$ (11) та $b_\tau^{(m)}(\mathbf{x},\tau,\Phi^{(m)})$ (12) після просторово-часової дискретизації для K-го кроку ($\sum_{k=1}^{K-1}\Delta\tau_k<\tau\le\sum_{k=1}^{K}\Delta\tau_k$, $0<\tilde{\tau}\le\Delta\tau_K$) отримано у вигляді

$$\mathbf{F}^{mK}(\mathbf{x},\tilde{\tau},\Phi_\tau^{(m)})=\sum_{v=1}^{V_m}A_v^{(m)}(\mathbf{x},\tilde{\tau},\Phi_\tau^{(m)})d_v^{mK},$$

$$b^{mK}(\mathbf{x},\tilde{\tau},\Phi^{(m)})=$$

$$=\sum_{q=1}^{Q_m+Q_{mp}}\int_{\Omega_{m0q}}\Phi^{(m)}(\mathbf{x},\tilde{\tau},\xi,0)p_0^{(mK)}(\xi)d\Omega_{m0q}(\xi), \quad (18)$$

де

$p_0^{(m1)}(\mathbf{x})=p_0^{(m)}(\mathbf{x})$, $p_0^{(mk)}(\mathbf{x})=p^{(m)}(\mathbf{x},\Delta\tau_{k-1})$, $k>1, x\in\Omega_m$, а в Ω_{m0} лінійно спадає від значення на межі Γ_m до нульового;

$$A_v^{(m)}(\mathbf{x},\tilde{\tau},\Phi_\tau^{(m)})=\int_{\Gamma_{mv}}\Phi_\tau^{(m)}(\mathbf{x},\tilde{\tau},\xi)d\Gamma_{mv}(\xi);$$

$$\Phi_\tau^{(m)}(\mathbf{x},\tilde{\tau},\xi)=\int_0^{\tilde{\tau}}\Phi^{(m)}(\mathbf{x},\tilde{\tau},\xi,\xi_4)d\xi_4;$$

$$U_\tau^{(m)}(\mathbf{x},\tilde{\tau},\xi)=\frac{1}{4\kappa_m\pi}E_1(\beta_{2m}),$$

$E_1(\beta)=\int_\beta^\infty\frac{exp(-z)}{z}dz$ – інтегро-показникова функція [6];

$$Q_\tau^{(m)}(\mathbf{x},\tilde{\tau},\xi)=\varepsilon_m\sum_{l=1}^{2}Q_{l\tau}^{(m)}(\mathbf{x},\tilde{\tau},\xi)\mathbf{n}_l^{(m)}(\mathbf{x});$$

$$\beta_{2m}=\frac{r^2}{4\kappa_m\tilde{\tau}};$$

$$Q_{\tau l}^{(m)}(\mathbf{x},\tilde{\tau},\xi)=\frac{y_l}{2\kappa_m\pi r^2}exp(-\beta_{2m});$$

$$Q_\tau^{(1,2)}(\mathbf{x},\tilde{\tau},\xi)=\varepsilon_2\sum_{l=1}^{2}Q_{l\tau}^{(2)}(\mathbf{x},\tilde{\tau},\xi)\mathbf{n}_l^{(1)}(\mathbf{x}).$$

Дискретно-континуальна модель для знаходження невідомих інтенсивностей джерел тиску, введених у пригранічних елементах

Для задоволення умов контакту (2) та граничних умов (3)-(5) використано колокаційну методику. Точки колокації вибрано у кінцевий моменти часу $\Delta\tau_K$ у середині кожного граничного елемента Γ_{mw}, $w=1,...,V_m$. З ГІР (13)-(17) після просторово-часової дискретизації для K-го кроку одержимо СЛАР, що відповідають різним типам задання граничних умов.

Зокрема, у випадку **гідронепроникності зовнішнього контура та відомого дебіту свердловин**, розміщених в зонах Ω_m, маємо:

$$\sum_{v=1}^{V_1}A_v^{(1)}(\mathbf{x}^{1w},\Delta\tau_K,Q_\tau^{(1)})d_v^{1K}=-b^{1K}(x^{1w},\Delta\tau_K,Q^{(1)}),$$

$$x^{1w}\in\Gamma_{1w}\subset\Gamma_z^{(1)},\ w=1,...,V_{1z}, \quad (19)$$

$$\sum_{v=1}^{V_1}A_v^{(1)}(x^{1w},\Delta\tau_K,U_\tau^{(1)})d_v^{1K}-\sum_{v=1}^{V_2}A_v^{(2)}(x^{1w},\Delta\tau_K,U_\tau^{(2)})d_v^{2K}=$$

$$=-b^{1K}(x^{1w},\Delta\tau_K,U^{(1)})+b^{2K}(x^{1w},\Delta\tau_K,U^{(2)}),$$

$$x^{1w}\in\Gamma_{1w}\subset\Gamma_{12},\ w=V_{1z}+1,...,V_{1z}+V_{12}, \quad (20)$$

$$\sum_{v=1}^{V_1}A_v^{(1)}(x^{1w},\Delta\tau_K,Q_\tau^{(1)})d_v^{1K}-\sum_{v=1}^{V_2}A_v^{(2)}(x^{1w},\Delta\tau_K,Q_\tau^{(1,2)})d_v^{2K}=$$

$$=-b^{1K}(x^{1w},\Delta\tau_K,Q^{(1)})+b^{2K}(x^{1w},\Delta\tau_K,Q^{(1,2)}),$$

$$x^{1w}\in\Gamma_{1w}\subset\Gamma_{12},\ w=V_{1z}+1,...,V_{1z}+V_{12}, \quad (21)$$

$$\sum_{v=1}^{V_1}A_v^{(1)}(\mathbf{x}^{1w},\Delta\tau_K,Q_\tau^{(1)})d_v^{1K}=q_{lz}^{(1)}(\mathbf{x}^{1w},\Delta\tau_K)-$$

$$-b^{1K}(\mathbf{x}^{1w},\Delta\tau_K,Q^{(1)}),$$

$$x^{1w}\in\Gamma_{1w}\subset\Gamma_{cl}^{(1)},\ w=V_{1z}+V_{12}+1,...,V_1, \quad (22)$$

$$\sum_{v=1}^{V_2}A_v^{(2)}(\mathbf{x}^{2w},\Delta\tau_K,Q_\tau^{(2)})d_v^{2K}=q_z^{(2)}(\mathbf{x}^{2w},\Delta\tau_K)-$$

$$-b^{2K}(\mathbf{x}^{2w},\Delta\tau_K,Q^{(2)}),$$

$$x^{2w}\in\Gamma_{2w}\subset\Gamma_c^{(2)},\ w=V_{12}+1,...,V_2. \quad (23)$$

Для **гідронепроникливого зовнішнього контура та відомого тиску на межах свердловин**, розміщених в зонах Ω_m, маємо СЛАР, складену з рівнянь (19)-(21) та наступних:

$$\sum_{v=1}^{V_1} A_v^{(1)}(\mathbf{x}^{1w},\Delta\tau_K,U_\tau^{(1)})d_v^{1K} = p_{lz}^{(1)}(\mathbf{x}^{1w},\Delta\tau_K) - b^{1K}(\mathbf{x}^{1w},\Delta\tau_K,U^{(1)}),$$

$$x^{1w}\in\Gamma_{1w}\subset\Gamma_{cl}^{(1)},\ w=V_{1z}+V_{12}+1,...,V_1, \quad (24)$$

$$\sum_{v=1}^{V_2} A_v^{(2)}(\mathbf{x}^{2w},\Delta\tau_K,U_\tau^{(2)})d_v^{2K} = p_c^{(2)}(\mathbf{x}^{2w},\Delta\tau_K) - b^{2K}(\mathbf{x}^{2w},\Delta\tau_K,U^{(2)}),\ x^{2w}\in\Gamma_{2w}\subset\Gamma_c^{(2)},$$

$$w=V_{2z}+V_{12}+1,...,V_2. \quad (25)$$

У випадку задання **тиску на зовнішньому контурі та дебіту на межах свердловин**, розміщених в зонах Ω_m, СЛАР складається з рівнянь (20)-(23) та наступного:

$$\sum_{v=1}^{V_1} A_v^{(1)}(\mathbf{x}^{1w},\Delta\tau_K,U_\tau^{(1)})d_v^{1K} = p_z^{(1)}(\mathbf{x}^{1w},\Delta\tau_K) - b^{1K}(\mathbf{x}^{1w},\Delta\tau_K,U^{(1)}),\ x^{1w}\in\Gamma_{1w}\subset\Gamma_z^{(1)},\ w=1,...,V_{1z}. \quad (26)$$

Якщо відомі **тиски на зовнішній межі та на контурах свердловин**, то у СЛАР входять рівняння (20), (21) та (24)-(26).

Зрозуміло, що для постійного кроку за часом матрицю систем (19)-(23); (19)-(21), (24), (25); (19)-(24), (26) або (20), (21), (24)-(26) обчислено один раз і збережено у пам'яті комп'ютера.

Знайшовши невідомі d_v^{mK}, використаємо формули, аналогічні (8)-(10), для обчислення шуканих тисків у вузлах, що описують внутрішні елементи $\Omega_{mq}\in\Omega_m$, в момент часу $\Delta\tau$:

$$p^{(mK)}(\mathbf{x}^{mqs},\Delta\tau) = \sum_{v=1}^{V_m} A_v^{(m)}(\mathbf{x}^{mqs},\Delta\tau,U_\tau^{(m)})d_v^{mK} + b^{mK}(\mathbf{x}^{mqs},\Delta\tau,U^{(m)}),\ \mathbf{x}^{mqs}\in\Omega_{mq},\ s=1,\ldots,8,$$

ці значення використано в операторі (18) для формування правої частини СЛАР на наступному часовому кроці.

Чисельні дослідження

Задача 1. Для оцінки впливу коефіцієнтів у привибійній зоні внаслідок кольматації чи інтенсифікації на тиск свердловини розглянуто область Ω, вибрану у формі еліпса з півосями a=200м, b=150 м, з круглою центральною свердловиною радіусом R_c=0.1 м, розміщеною в області Ω_2, яка мала вигляд круга радіусом $R_2=1$ м. Отже, межа поділу середовищ мала вигляд: $\Gamma_{12}=\{(x_1,x_2): x_1^2+x_2^2=R_2\}$.

На зовнішньому контурі й на межі свердловини тиск спадав з часом:

$$p_z^{(1)}(\mathbf{x},\tau)=P^{(1)}(\tau)=\frac{P_z-0.001k(\Delta\tau)\cdot10^6}{86400}\ \text{Па}, \quad (27)$$

$$p_c^{(2)}(\mathbf{x},\tau)=P^{(2)}(\tau)=\frac{P_w-0.05k(\Delta\tau)\cdot10^6}{86400}\ \text{Па}, \quad (28)$$

де $P_z=20\cdot10^6$ Па, $P_w=16\cdot10^6$ Па,

Початковий розподіл тиску у пласті з урахуванням узгодженості початкової та граничних умов моделювали у вигляді функції:

$$p_0^{(m)}(\mathbf{x})=P_z-\frac{(P_z-P_w)(r-r_{el})}{(R_c-r_{el})}, \quad (29)$$

де r, r_{el} – відстані в полярних координатах до точки $\mathbf{x}$ та до відповідної їй на зовнішній межі еліпса.

Часовий інтервал $\mathbf{T}=\{\tau: 0<\tau<864000\}$с (10 діб) рівномірно розбивали на 100 проміжків, крок за часом вибирали постійним $\Delta\tau=8640$ с (0.1 доби). Зовнішню межу рівномірно розбивали на 16 граничних елементів ($V_{1z}=16, V_{2z}=0$), контур центральної свердловини – на $V_{2c}=2$, межу контакту – на $V_{12}=8$. Товщини пригранічних областей та областей продовжених початкових умов були такими: $h_z=h_{pz}=20$ (для зовнішнього контура), $h_w=h_{pw}=0.05$ (для свердловини) та $h_{12cont}=h_{p12cont}=7$, $h_{21cont}=h_{p21cont}=20$ (для межі контакту), тобто СЛАР (20), (21), (24)-(26) складалась з 34 рівнянь. Кількість внутрішніх елементів, на які дискретизували області Ω_1, Ω_2 та Ω_{mp} дорівнювала відповідно $Q_1=32$, $Q_2=8$, $Q_{1p}=24$, $Q_{2p}=18$ (зрозуміло, що вона ніяк не впливала на розмірність матриці, оскільки інтеграл від початкової умови входить у праву частину СЛАР (20), (21), (24)-(26).

Фізичні характеристики пласта вибирали такими: $k_1=0.16\cdot10^{-12}$ м^2; $k_2=0.08\cdot10^{-12}$ м^2; $\mu_1=0.707\cdot10^{-3}$ Па·с; $\mu_2=1.232\cdot10^{-3}$ Па·с; $\beta_1^*=7.07\cdot10^{-10}$ Па$^{-1}$; $\beta_2^*=4.06\cdot10^{-10}$ Па$^{-1}$; h=18м;

Оскільки похибки, що виникають під час застосування непрямого методу пригранічних елементів, зумовлені тільки процедурами апроксимації, дискретизації та числового інтегрування, спочатку досліджували точність задоволення граничних умов та умов ідеального контакту в різні моменти часу:

$$\delta p_{z1}(\mathbf{x}^{1w},l\Delta\tau)=\frac{p^{(1)}(\mathbf{x}^{1w},l\Delta\tau)-P_z(l\Delta\tau)}{P_z(l\Delta\tau)},\quad \mathbf{x}^{1w}\in\Gamma_{1w}\subset\Gamma_z^{(1)}, \quad (30)$$

$$\delta p_{w2}(\mathbf{x}^{2w},l\Delta\tau)=\frac{p^{(2)}(\mathbf{x}^{2w},l\Delta\tau)-P_{w1}(l\Delta\tau)}{P_{w1}(l\Delta\tau)},\quad \mathbf{x}^{2w}\in\Gamma_{2w}\subset\Gamma_w^{(2)}, \quad (31)$$

$$\delta p_{12}(\mathbf{x}^{1w},l\Delta\tau)=\frac{p^{(1)}(\mathbf{x}^{mw},l\Delta\tau)-p^{(2)}(\mathbf{x}^{mw},l\Delta\tau)}{p^{(1l)}(\mathbf{x}^{mw},l\Delta\tau)},\quad \mathbf{x}^{1w}\in\Gamma_{1w}\subset\Gamma_{12}, \quad (32)$$

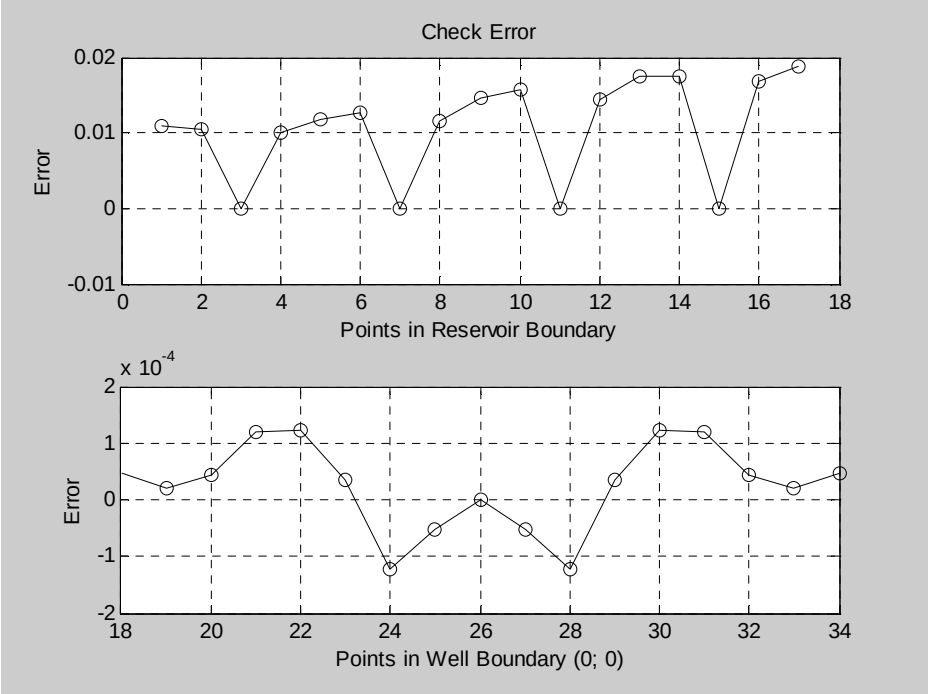


Рисунок 1 – Точність задоволення граничних умов на четвертині зовнішнього контурі та на половині межі свердловини

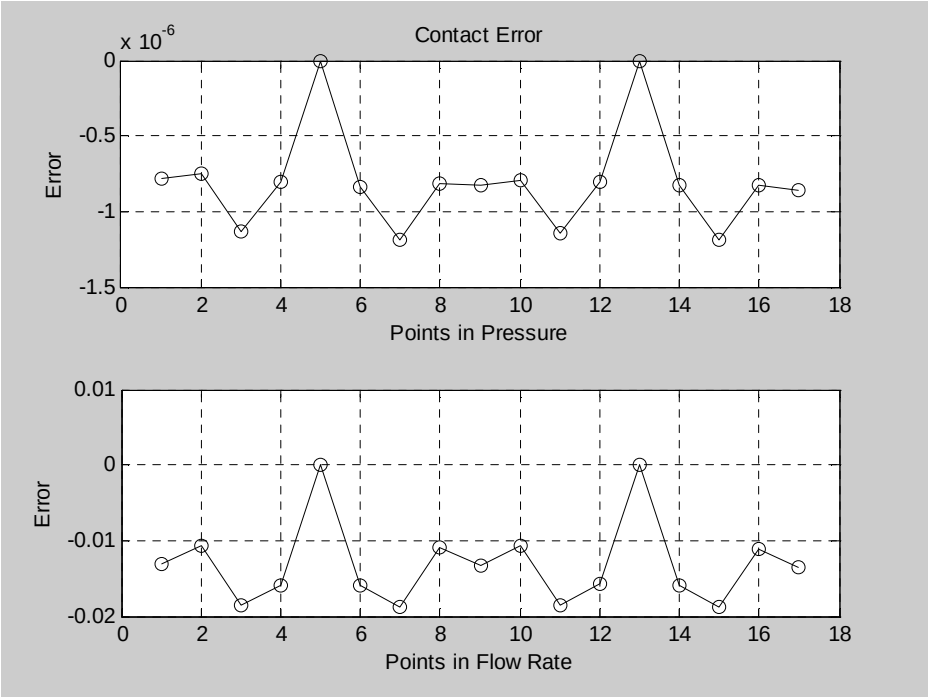


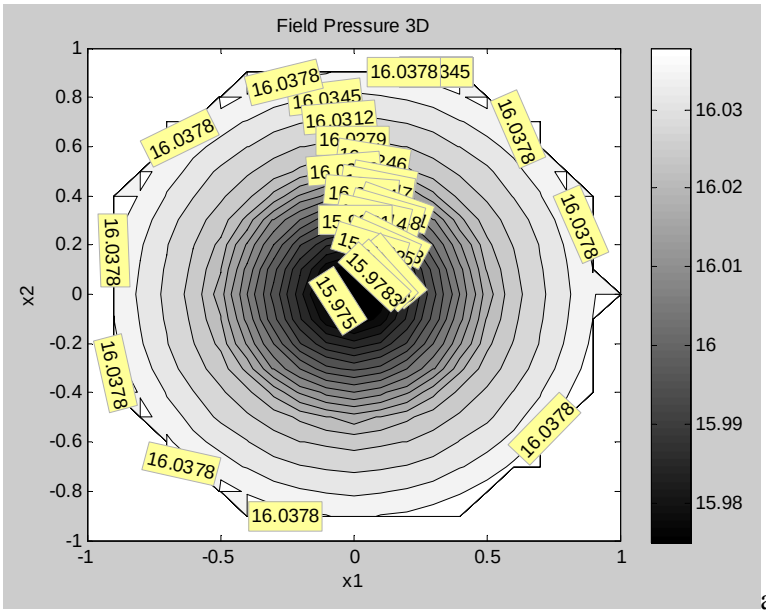
Рисунок 2 – Точність задоволення умов ідеального контакту на межі поділу середовищ непрямим методом приграничних елементів

$$\delta q_{12}(\mathbf{x}^{1w}, l\Delta\tau) = \frac{\varepsilon_1 \dfrac{\partial p^{(1)}(\mathbf{x}^{mw}, l\Delta\tau)}{\partial \mathbf{n}^{(1)}(\mathbf{x})} - \varepsilon_2 \dfrac{\partial p^{(2)}(\mathbf{x}^{mw}, l\Delta\tau)}{\partial \mathbf{n}^{(1)}(\mathbf{x})}}{\varepsilon_1 \dfrac{\partial p^{(1)}(\mathbf{x}^{mw}, l\Delta\tau)}{\partial \mathbf{n}^{(1)}(\mathbf{x})}},$$

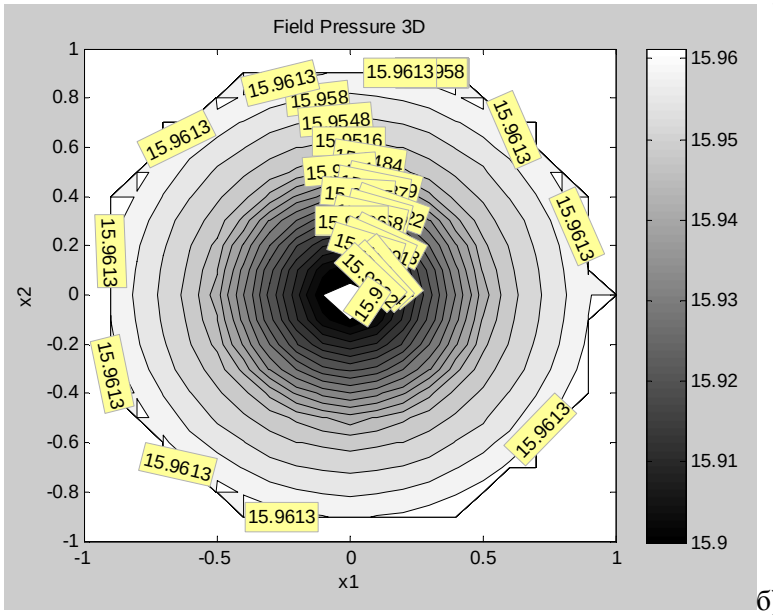
$$\mathbf{x}^{1w} \in \Gamma_{1w} \subset \Gamma_{12}. \qquad (33)$$

На рис. 1, 2 зображено відносні похибки задоволення граничних умов у момент часу $\Delta\tau = 21600$ с на першій чверті зовнішнього контура, на половині межі свердловини та на межі контакту, обчислені відповідно за формулами (30)-(33).

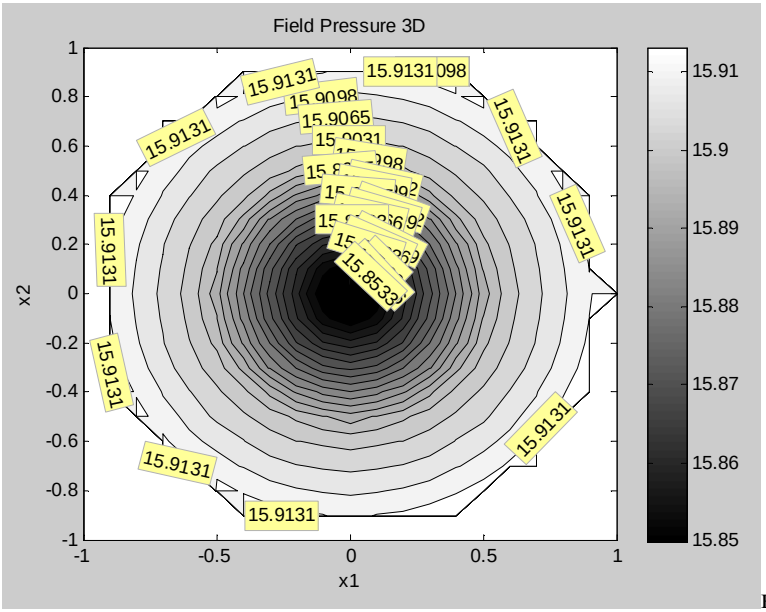
Зауважимо, що у точках колокації похибка відсутня; найбільша похибка спостерігається з наближенням до кінців граничних елементів. Усередині області похибки будуть меншими внаслідок виконання принципу максимуму. На рис. 3 подано отриманий непрямим методом



а)



б)



в)

Рисунок 3 – Розподіл тиску в області Ω_2 у різні моменти часу: 0.5 доби (а), 2 доби (б), 3 доби (в)

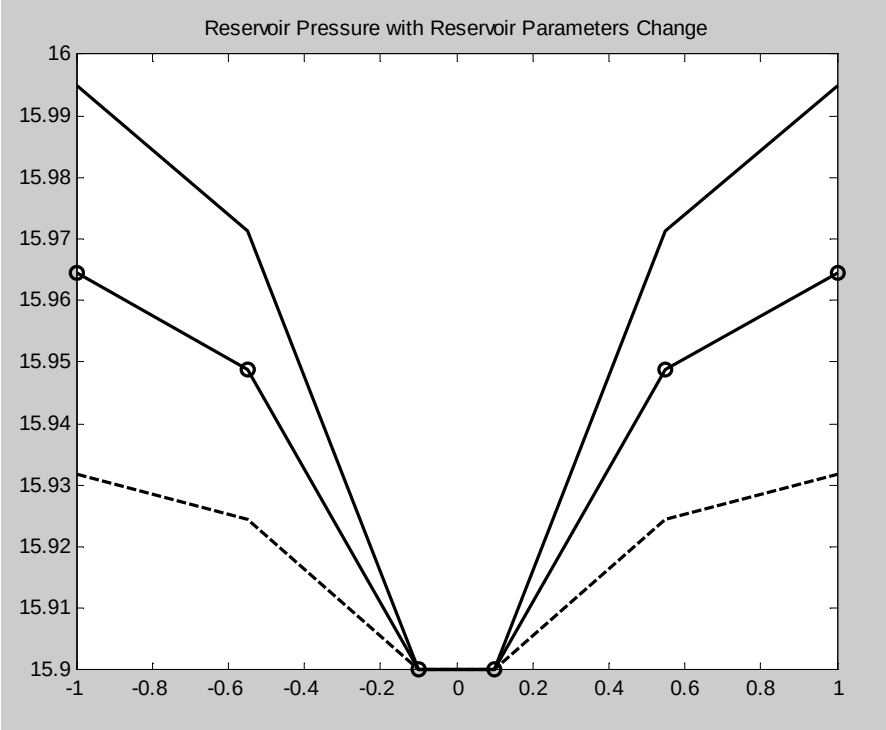


Рисунок 4 – Розподіл тиску в області Ω_2 у момент часу 2 доби з врахуванням впливу характеристик середовищ

приграничних елементів розподіл тиску в області Ω_2 з центральною свердловиною. На рис. 4 подано розподіл тиску в області Ω_2 з врахуванням впливу характеристик середовища на тиск, при цьому суцільна лінія – тиск, отриманий за значень

$$k_1 = 0.16\cdot10^{-12}\ \text{м}^2;\ k_2 = 0.08\cdot10^{-12}\ \text{м}^2;$$

$$\mu_1 = 0.707\cdot10^{-3}\ \text{Па}\cdot\text{с};\ \mu_2 = 1.232\cdot10^{-3}\ \text{Па}\cdot\text{с};$$

$$\beta_1^* = 7.07\cdot10^{-10}\ \text{Па}^{-1};\ \beta_2^* = 4.06\cdot10^{-10}\ \text{Па}^{-1}$$

(значини фізичних характеристик в області Ω_2 удвічі менші, ніж в області Ω_1); пунктирна – $k_1 = k_2 = 0.16\cdot10^{-12}\ \text{м}^2;\ \mu_1 = \mu_2 = 0.707\cdot10^{-3}\ \text{Па}\cdot\text{с};$ $\beta_1^* = \beta_2^* = 7.07\cdot10^{-10}\ \text{Па}^{-1}$ (середовище однорідне); криві з символами «**o**» –

$$k_1 = 0.12\cdot10^{-12}\ \text{м}^2;\ k_2 = 0.08\cdot10^{-12}\ \text{м}^2;$$

$$\mu_1 = 0.898\cdot10^{-3}\ \text{Па}\cdot\text{с};\ \mu_2 = 1.232\cdot10^{-3}\ \text{Па}\cdot\text{с};$$

$$\beta_1^* = 5.56\cdot10^{-10}\ \text{Па}^{-1};\ \beta_2^* = 4.06\cdot10^{-10}\ \text{Па}^{-1}$$

(значини фізичних характеристик в області Ω_2 в півтора рази менші, ніж в області Ω_1). Як бачимо, зменшення коефіцієнта п'єзопровідності в Ω_2 веде до зменшення тиску в точках пласта, що належать Ω_2.

Задача 2. Для оцінки впливу фізичних коефіцієнтів на тиск з врахуванням структурних порушень розглянуто область Ω, вибрану у формі еліпса з півосями *a*=200м, *b*=150 м, з трьома свердловинами радіусом R_c =0.1 м (центральна розміщена в області Ω_2, дві інші – в Ω_1), причому межі поділу середовищ Γ_{12} мали форму еліпса з півосями $a_2 = 50$ м, b_2 =37.5м. Координати центрів двох інших свердловин були такими: $x_{1,1c}^{(1)} = -175, x_{2,1c}^{(1)} = 0$; $x_{1,2c}^{(1)} = 175, x_{2,2c}^{(1)} = 0$.

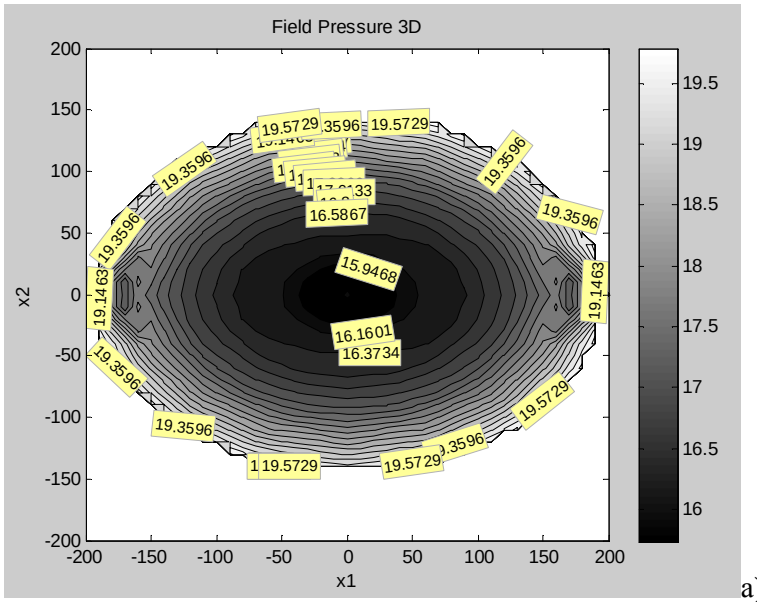
На зовнішньому контурі й на межі центральної свердловини тиск спадав з часом як функції (27)-(28), а на межі двох інших був заданий формулою:

$$p_{lc}^{(1)}(\mathbf{x},\tau) = P_l^{(1)}(\tau) = \frac{P_{0l}^{(1)} - 0.05k(\Delta\tau)\cdot10^6}{86400}\ \text{Па},$$

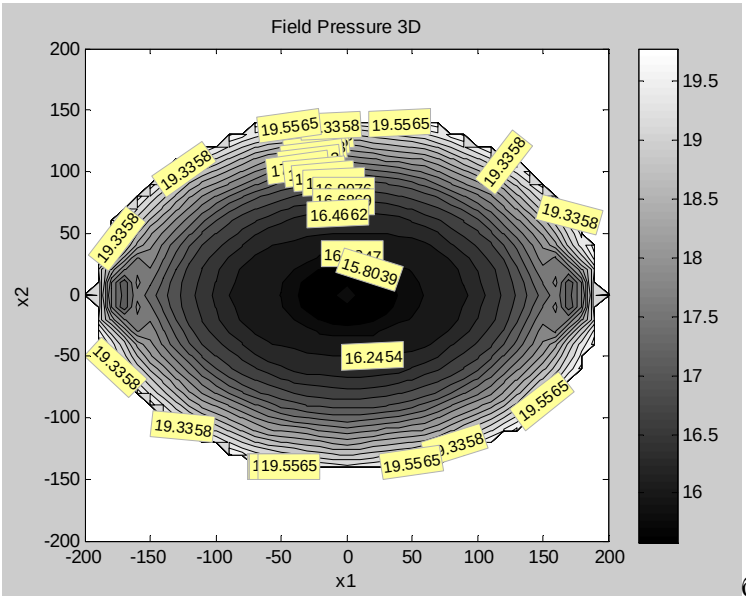
де $P_{01}^{(1)} = P_{02}^{(1)} = 17\cdot10^6$ Па.

Початковий розподіл тиску у пласті з урахуванням узгодженості початкової та граничних умов моделювали у вигляді функції (29). Кількість та товщини приграничних елементів вибирали аналогічно, як в задачі 1, окрім того, контури двох інших свердловин дискретизували на $V_{11c} = V_{12c}$ =2, область Ω_1 розбивали на $Q_1 = 36$ внутрішніх елементів, область продовженої початкової умови на $Q_{1p} = 28$ елементів, а СЛАР складалась з 38 рівнянь, а крок за часом брали рівним $\Delta\tau = 21600$ с (0.25 доби).

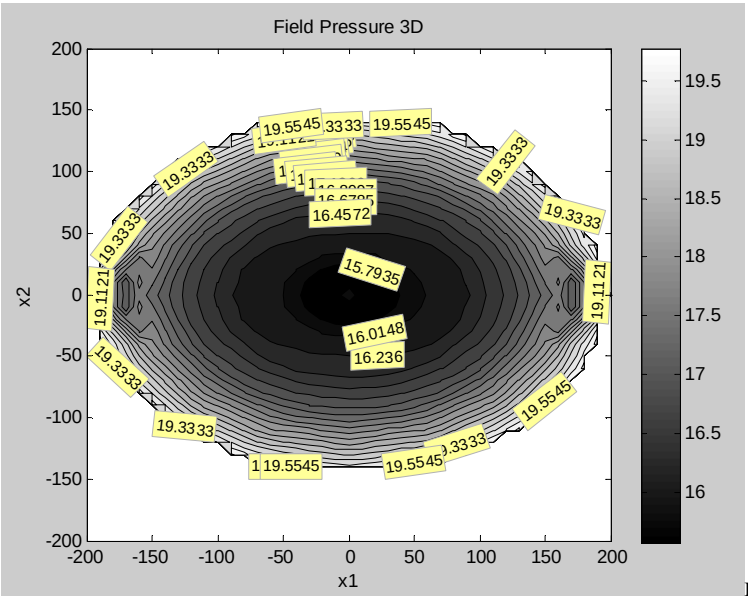
На рис. 5 подано отриманий непрямим методом приграничних елементів розподіл тиску в пласті з трьома свердловинами, при цьому $h_{12cont} = h_{p12cont} = 10$. На рис. 6 подано розподіл тиску в пласті з трьома свердловинами з урахуванням кроку за часом:



а)

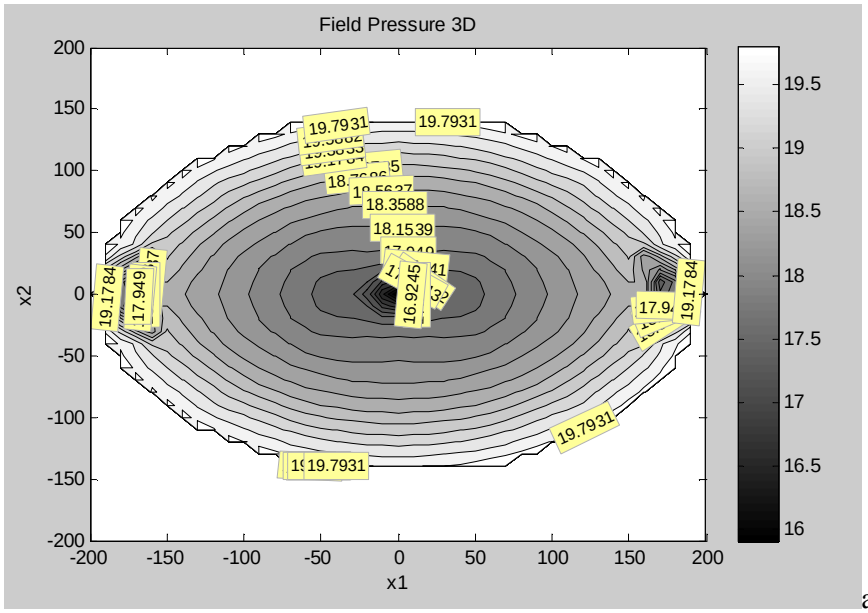


б)

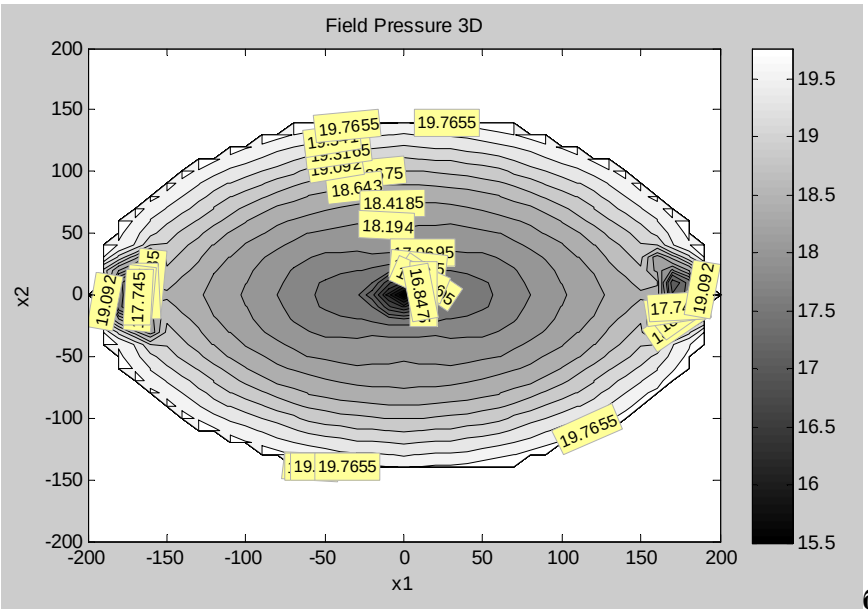


в)

Рисунок 5 – Розподіл тиску в пласті з трьома свердловинами у різні моменти часу: 0.5 діб (а), 2 доби (б), 3 доби (в), кроком за часом 0.25 доби



а)



б)

Рисунок 6 – Розподіл тиску в пласті з трьома свердловинами у різні моменти часу: 2 діб (а), 10 діб (б), кроком за часом 1 доба

п $h_{12cont} = h_{21cont} = 6$,

$k_1 = 0.12 \cdot 10^{-12}$ м^2, $k_2 = 0.08 \cdot 10^{-12}$ м^2,

$\mu_1 = 0.898 \cdot 10^{-3}$ Па$\cdot$с, $\mu_2 = 1.232 \cdot 10^{-3}$ Па,

$\beta_1^* = 5.56 \cdot 10^{-10}$ Па$^{-1}$, $\beta_2^* = 4.06 \cdot 10^{-10}$ Па$^{-1}$

і кроком за часом $\Delta\tau = 86400$ с (1 доба).

Висновки

Побудовано наближені до реальних середовищ математичні моделі зміни в часі тиску (двовимірні обмежені кусково-однорідні пласти з криволінійними межами) з урахуванням ідеального контакту на межі поділу середовищ, кількості свердловин, гідронепроникності зовнішнього контура, депресії тисків та дебіту свердловин. Для знаходження розв'язку задачі використано непрямий метод пригранічних елементі спільно з часовою схемою послідовності початкових умов, що дозволило точно задовольнити рівняння в усій досліджуваній області та контролювати похибку задоволення граничних умов на її межах та на межі поділу середовищ (внаслідок можливості вибору кроку за часом, кількості пригранічних елементів, товщин пригранічних областей та областей продовжених початкових умов). Здійснено програмну реалізацію запропонованого чисельно-аналітичного підходу з використанням системи MATLAB та проведено низку досліджень впливу фізичних та часових параметрів на розподіл тиску і дебіту у привибійній зоні свердловин, що дає можливість оцінити можливість інтенсифікації їх роботи.

Розроблена методика може бути розширена для врахування залежності фізичних характеристик від координат, що ми і плануємо здійснити в наступних дослідженнях.

Література

1 Бойко В.С. Підземна гідрогазомеханіка: підручник / В.С.Бойко, Р.В.Бойко. –Львів: Апріорі, 2007. – 452 с.

2 Журавчак Л.М. Метод пригранічних елементів у прикладних задачах математичної фізики / Л.М.Журавчак, Є.Г.Грицько . – Львів: Карпатське відділення Інституту геофізики НАН України, 1996. – 220 с.

3 Владимиров В.С. Уравнения математической физики / В.С. Владимиров. – М.: Наука, 1971. – 512 с.

4 Методы граничных элементов / К.Бреббия, Ж.Теллес, Л.Вроубел. – М.: Мир, 1987. – 524 с.

5 Бенерджи П. Метод граничных элементов в прикладных науках / П.Бенерджи , Р.Баттерфилд . – М.: Мир, 1984. – 494 с.

6 Справочник по специальным функциям с формулами, графиками и математическими таблицами: пер. с англ. под ред. А.А. Абрамовица И.И. Стиган – М.: Наука, 1979. – 832 с.

7 Журавчак Л.М. Розв'язування задач неусталеної фільтрації пружної рідини в недеформівному пористому пласті методом пригранічних елементів / Л.М.Журавчак, А.Є. Струк : Матеріали наукової конференції-семінару «Сейсмологічні та геофізичні дослідження в сейсмоактивних регіонах» (м. Львів, 29-30 травня 2012 р.). – Львів: «Сполом», 2012. – С. 45–49.

8 Журавчак Л.М. Порівняння методів граничних та пригранічних елементів при знаходженні неусталеного тиску у пружному пористому замкненому пласті / Л.М.Журавчак, А.Є. Струк // Вісник НУ "Львівська політехніка". – Сер. "Комп'ютерні науки та інформаційні технології", Львів, 2012. – № 732. – С. 198-206.

Стаття надійшла до редакційної колегії 23.01.13
Рекомендована до друку професором ***Федоришиним Д.Д.*** *(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ) професором* ***Максимчуком В.Ю.*** *(Інститут геофізики ім. С.І.Субботіна НАН України, Карпатське відділення, м. Львів)*

УДК 622. 691.279. 72

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НЕРАВНОВЕСНОГО ТЕЧЕНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА ПРИ ТРАНСПОРТИРОВКЕ В КАНАЛАХ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

[1] А. Н. Гурбанов, [2] Ф. Г. Исмаилов

[1] НИПИнефтегаз, г. Баку ул. Г. Зардаби 88,
e-mail: q a b d u l a q a @ m a i l . r u

[2] ПО Азнефть, г. Баку, ул, Ага Нейматулла 21

На газових промислах організовується комплексна підготовка газу до віддаленого транспортування, в схемі якої основну роль відіграють масообмінні апарати.

Розроблено моделі утворення та руху гідратів у газопроводах і масообмінних апаратах абсорбційного осушування природного газу. Розроблено модель утворення гідратів під час руху каналами сирого газу, що заснована на рівняннях гідродинаміки і теплообміну в осесиметричній постановці. Представлено математичну модель нерівноважної течії природного газу з конденсованою фазою в криволінійних каналах. Наведено технологічні та конструкторські шляхи поліпшення роботи АВО (апаратів повітряного охолодження) сирого газу.

Ключові слова: масообмін, гідратоутворення, блоки АВО, математична модель, труби.

На газовых промыслах организуется комплексная подготовка газа к дальнему транспорту, в схеме которой основную роль играют массообменные аппараты.

Разработаны модели образования и движения гидратов в газопроводах и массообменных аппаратах абсорбционной осушки природного газа. Разработана модель образования гидратов при течении в каналах сырого газа, основанная на уравнениях гидродинамики и теплообмена в осесимметричной постановке. Представлена математическая модель неравновесного течения природного газа с конденсированной фазой в криволинейных каналах. Приведены технологические и конструкторские пути улучшения работы АВО (аппаратах воздушного охлаждения) сырого газа.

Ключевые слова: массообмен, гидратообразование, блоки АВО, математическая модель, трубы.

The article deals with complex preparation of gas transportation for long distances. Mass transfer apparatus play the key role in the scheme.

The models of gas hydrates formation and motion in gas pipelines and mass transfer apparatus of absorptive natural gas dehydration were worked out. The model of gas hydrates formation during the channel flow of crude gas was also developed. The scheme of the model is based on the hydrodynamics and heat exchange equations in axisymmetric position. The mathematical model of a nonequilibrium flow of natural gas with the condensed phase in curved channels was presented. Besides technological and engineering ways to improve the work of crude gas air cooling devices were elaborated.

Keywords: mass transfer, hydrates formation, blocks of air cooling devices, mathematical model, pipelines

Развитие газодобывающей промышленности связано с эксплуатацией и сооружением крупных промыслов и строительством мощных магистральных газопроводов. На газовых промыслах организуется комплексная подготовка газа к дальнему транспорту, в схеме которой основную роль играют массообменные аппараты. Усилия специалистов направлены на разработку технических решений, позволяющих интенсифицировать процесс массообмена, увеличить производительность и уменьшить вынос абсорбента из аппаратов [1].

Осушка газа при его подготовке в промысловых условиях направлена на предотвращение гидратообразования. Образование газовых гидратов обусловлено термобарическими условиями в трубопроводах и аппаратах, наличием свободной капельной влаги, образованием центров кристаллизации. Разработка современных технологических процессов переработки природного углеводородного сырья и оптимальная эксплуатация действующих производств невозможна без применения моделирующих программ, позволяющих без значительных материальных и временных затрат производить исследования этих процессов. Такие модельные исследования имеют огромное значение не только для проектирования, но для функционирования существующих производств, так как позволяет учесть влияние внешних факторов (изменение состава сырья, изменение требований к конечным и промежуточным продуктам и т.д.) на показатели действующих производств [2]. Подготовки и переработки природного углеводородного сырья, экспериментальное и численное моделирование физических процессов подготовки промыслового газа являются актуальными и важными задачами обеспечения требуемых потребительских свойств природного газа. Разработке и научном обосновании математических моделей термогазодинамических процессов современных технологий подготовки природного газа в промысловых условиях, обеспечивающих товарные показатели газа при эксплуатации действующих производств.

Для реализации поставленной цели необходимо решить и разработать числовую модель образования гидратов в аппаратах и трубопро-

водах, провести численные расчеты неравновесного течения природного газа с конденсированной фазой в каналах сложной формы[3].

На газовых и газоконденсатных месторождениях нашли широкое применение АВО. Блоки АВО состоят из 10÷16 аппаратов. В каждом аппарате имеются три продольные теплообменные секции с шестью рядами горизонтальных оребренных труб. В каждом ряду тридцать (двадцать девять) труб, расположенных в шахматном порядке. Восходящий поток холодного воздуха через эти ряды труб создается двумя вентиляторами, установленными на фундаменте под трубчатыми секциями.

АВО в безгидратном режиме работы удовлетворительно охлаждают осушенный природный газ, а также сырой газ при положительных температурах окружающего воздуха. Однако в зимних условиях в процессе охлаждения сырого газа после прохождения первой ступени появляется ряд проблем. В нижнем ряду труб в результате локального переохлаждения газа возникают условия для гидратообразования. На внутренней стенке теплообменных труб образуются гидраты и лед, в результате чего отдельные трубы разрушаются.

Для предотвращения процессов гидратообразования при охлаждении сырого газа в трубах АВО на практике приходится поддерживать достаточно высокую среднюю температуру газа на выходе из аппаратов (иногда до 18÷20 °С), ограничивая тем самым не только потенциальные возможности АВО, но и снижая качество газа, подготавливаемого к транспорту. Особенно остро стоит вопрос качества подготовки газа по показателю «температура точки росы» по влаге в условиях падающего пластового давления [4].

Основной целью АВО, охлаждающего сырой газ является получение минимальной температуры газа, подаваемого на осушку при подготовке его к дальнему транспорту.

Кроме эффекта отложения на стенках труб, твердые частицы могут оказывать абразивное воздействие на конструктивные элементы запорной и измерительной газовой аппаратуры. Конденсированная фаза при течении природного газа кроме гидратов может содержать другие твердые примеси (окалина, песок и др.) Оценку такого воздействия можно провести путем решения уравнений движения двухфазной смеси в элементах газопровода.

Уравнения для дисперсной фазы записывались в криволинейной системе координат.

$$\left(Jr^{\gamma} n u_s\right)_{\xi} + \left(Jr^{\gamma} n v_s\right)_{\eta} = 0 \ ;$$

$$\left(Jr^{\gamma} \rho_s u_s u_s\right)_{\xi} + \left(Jr^{\gamma} \rho_s v_s u_s\right)_{\eta} +$$

$$+ r^{\gamma} \rho_s v_s u_s J_{\eta} - r^{\gamma} \rho_s v_s v_s J_{\xi} = J^2 r^{\gamma} Q_2 \ ;$$

$$\left(Jr^{\gamma} \rho_s u_s v_s\right)_{\xi} + \left(Jr^{\gamma} \rho_s v_s v_s\right)_{\eta} +$$

$$+ r^{\gamma} \rho_s v_s u_s J_{\xi} - r^{\gamma} \rho_s v_s v_s J_{\eta} = J^2 r^{\gamma} Q_3 \ ;$$

$$\left(Jr^{\gamma} \rho_s u_s E_s\right)_{\xi} + \left(Jr^{\gamma} \rho_s u_s E_s\right)_{\eta} = J^2 r^{\gamma} Q_1 \ ;$$

$$\left(Jr^{\gamma} n_s u_s\right)_{\xi} + \left(Jr^{\gamma} n_s v_s\right)_{\eta} = 0 \ ,$$

где индекс S принадлежит дисперсной фазе;

c_s, ρ_l – теплоемкость и плотность вещества капель;

n - число конденсированных частиц в единице объема;

B_u, B_T – коэффициенты сопротивления и теплообмена между фазами, определяемые по формулам:

$$B_u = \frac{9\mu}{2\rho_l r_s^2} f \ ;$$

$$f = 1 + 0{,}25\sqrt{\mathrm{Re}} + 0{,}0117\,\mathrm{Re} \ ;$$

$$\mathrm{Re} = \frac{|v - v_s| r_s \rho}{\mu} \ ;$$

$$B_T = \frac{B_u \ Nu \, c_p}{3\,\mathrm{Pr}\, c_s \ f} \ ;$$

$$Nu = 2 + 0{,}459\,\mathrm{Re}^{0{,}55}\,\mathrm{Pr}^{0{,}33} \ .$$

Для решения уравнений, описывающих движение частиц, построена разностная схема, следящая за направлением течения. Для решения разностных уравнений применяется двухуровневый итерационный процесс. В качестве начального приближения для скоростей частиц берутся скорости газа. Численный метод позволяет рассчитывать поля скоростей газовой и дисперсной фаз, траектории движения частиц, массовый поток осаждающихся на стенки частиц.

Движение газовой фазы рассчитывалось при числе Рейнольдса 50000. Векторное поле скоростей приведено на рис. 1.

Как следует из результатов расчетов, поле течения не является симметричным. Сначала течение поджимается к стенке малого радиуса, а затем в противоположную сторону. В результате отклонения течения от центра образуются вихревые течения, как это видно на рис. 1. Профиль скорости имеет характерный турбулентный профиль.

Движение частиц рассчитывалось для эквивалентных диаметров частиц от 10 мкм до 500 мкм. Траектории частиц представлены на рис. 2. Частицы малого размера (10 мкм) отслеживают линии тока газовой фазы и со стенками практически не взаимодействуют. Более крупные частицы диаметром 100 мкм соударяются со стенкой трубы после изгиба.

Большие частицы (300 и 500 мкм) имеют более прямые траектории на участке изгиба трубы и соударяются со стенкой с высокой интенсивностью. Низкоскоростные частицы в 300 мкм могут захватываться вихревым течением газа и находиться в нем некоторое время. Крупные частицы диаметром 500мкм почти все проникают сквозь вихрь. Только частицы из пристеночной области с очень малыми скоростями совершают в вихре возвратное движение.

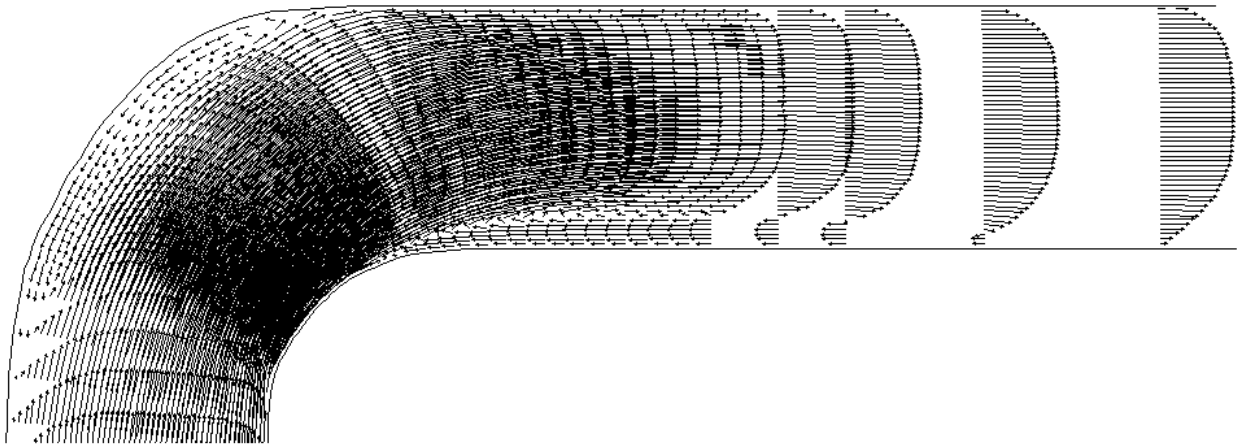


Рисунок 1 – Поле скоростей на криволинейном участке трубы

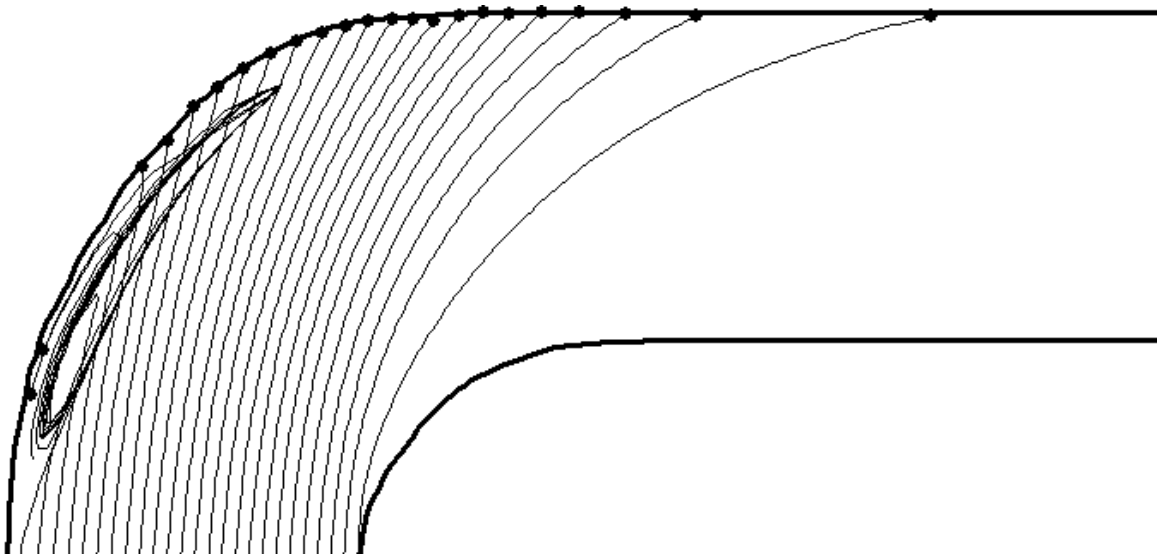


Рисунок 2 – Траектории частиц диаметром 300 мкм

В результате решения задачи о движении двухфазной смеси частиц и газа по криволинейному участку трубы рассчитаны массовые потоки выпадающих на стенку частиц различных размеров.

На рис. 3 показаны распределения масссовых потоков осаждающихся частиц *G* разных размеров. Координата S отсчитывается по стенке трубы. Массовый поток *G* отнесен к массовому расходу частиц на прямолинейном участке трубы ($\rho_s W_s$). Эти данные могут быть использованы при оценке механического воздействия частиц на стенки трубопроводов при различной степени осушки природного газа.

Для исследования фактического состояния вопроса эксплуатации АВО на НГДУ "Гум адасы" был изучен опыт работы аппаратов воздушного охлаждения. В настоящей работе основное внимание направлено на возможность снижения температуры охлаждаемого природного газа перед его осушкой и подготовкой к транспорту. Для обеспечения антигидратных условий эксплуатации АВО в зимний период рассмотрим использование следующих технических решений:

1) распределение потока газа с увеличением расхода от верхнего к нижнему ряду теплообменных трубок при сохранении среднего расхода по секции аппарата;

2) подача ингибитора в зону наиболее вероятного появления гидратов (нижний ряд труб);

3) комбинированное техническое решение из приведенных выше двух направлений.

Рассмотрим первое техническое решение. Шесть рядов по вертикали теплообменных труб в каждой секции аппарата соединены распределительной и сборной камерами, которые можно рассматривать соответственно как коллекторы для подачи и отбора газа в процессе его охлаждения. Минимизация условий гидратообразования в газе требует максимального расхода потока газа в нижнем ряду при постоянном среднем потоке через секцию. Этому условию будет соответствовать схема подключения газа при перекрестном движении теплоносителей. Схема подсоединения охлаждаемого газа от существующей схемы отличается тем, что в распределительную камеру секции аппарата газ подается не снизу, а сверху. Предлагаемая схема распределения потоков полезна не только с точки зрения возможности тор-

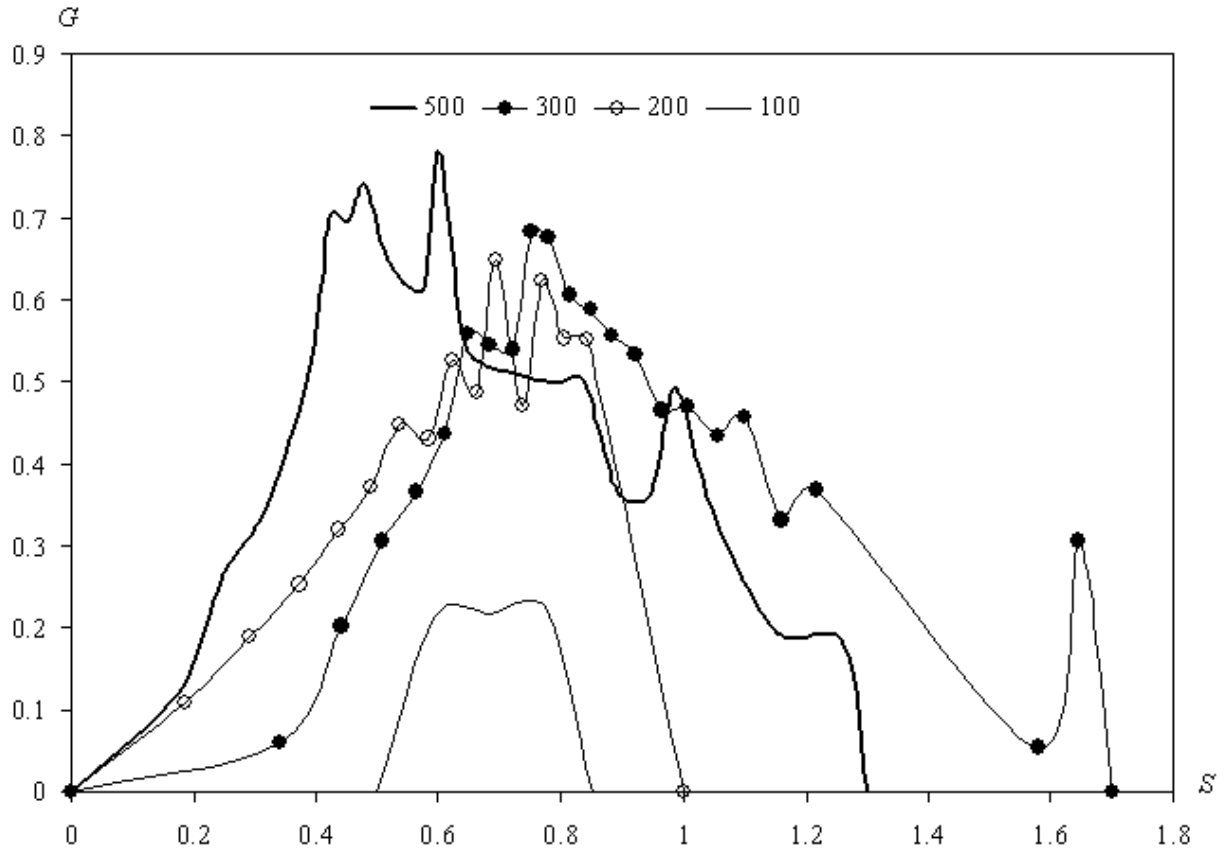


Рисунок 3 – Распределение массовых потоков, осаждающихся на стенку трубы частиц

можения процесса гидратообразования, но и способствует ускоренной эвакуации зародышей гидратов из нижних рядов труб за счет наибольшей скорости газового потока, определяемой предлагаемой схемой. Однако результаты испытаний показали незначительное увеличение эффективности процесса. В данном случае следует организовать циркуляцию абсорбента через работающий аппарат, подавая его в распределительную камеру (коллектор) каждой секции (в аппарате их три) и, отбирая из собирающей камеры (коллектора), накапливать в специальной буферной емкости, откуда забирать насосом и подавать на рециркуляцию. При повышении уровня абсорбента в распределительной камере трубного пучка до сечения труб нижнего ряда метанол захватывается потоком газа и транспортируется по всем теплообменным трубам нижнего ряда, разрушая имеющиеся гидраты и не позволяя появляться новым. Для накопления абсорбента в распределительной камере необходимо, чтобы в отверстие для подачи газа был вставлен патрубок, и газ подавался бы в верхнюю зону распределительной камеры.

Положительные стороны предлагаемого решения: разрушаются образовавшиеся гидраты и лед не только в нижних теплообменных трубах, но и в собирающих и, что особенно важно в распределительных камерах секций АВО; решение способствует эвакуации воды, жидких углеводородов, мехпримесей и т.д. из нижних теплообменных труб, не позволяя развиваться зародышам гидратов и льда. Абсорбент в необходимом количестве подается непосредственно в зону гидратообразования; создается дополнительное термическое сопротивление теплопередаче от фронтального воздействия потока холодного воздуха; процесс может быть организован как на постоянной, так и на эпизодической (временной) основе; минимальные потери абсорбента с газом.

Подача газа в верхнюю зону рас пределительной камеры секции АВО без больших материальных затрат приводит к условиям схемы подключения газа с увеличением расхода газа по нижнему ряду теплообменных труб.

Более надежно метанол подавать в теплообменные трубы с помощью фитилей, одним концом помещенных в теплообменные трубы на 100…150 мм, а другим – в находящийся в распределительной камере абсорбент. Поток газа с фитиля будет увлекать с собой абсорбент через всю трубу.

Другая возможность принудительно подать абсорбент – установить в торце теплообменных труб вспомогательные Г-образные трубы внутренним диаметром 2..3 мм. Располагать их следует аналогично фитилям. Абсорбент за счет эжекции газом будет подаваться из распределительной камеры в теплообменные трубы. Эжекционную часть вспомогательной трубы целесообразно расположить у стенки в нижней части теплообменной трубы, чтобы подаваемое количество абсорбента не было излишним.

Вывод

Научно обоснованы технологические схемы и характеристики процессов подготовки природного газа к дальнему транспорту. Разработаны модели образования и движения гидратов в газопроводах и массообменных аппаратах абсорбционной осушки природного газа.

Разработана модель образования гидратов при течении в каналах сырого газа, основанная на уравнениях гидродинамики и теплообмена в осесимметричной постановке.

Разработана методика оценки выпадения конденси рованной фазы при движении природного газа, использующая результаты совместного численного решения уравнений для газовой и конденсированной фаз в двумерной постановке. В технологическом плане выявлены перспективные решения подачи абсорбента в нижний ряд теплообменных трубок секции и рециркуляция его через АВО.

Литература

1 Истомин В. А. Мониторинг термобарических параметров работы газосборной системы УКПГ сеноманской залежи в период падающей добычи / В. А.Истомин и др. // Приложение к журналу «Наука и техника в газовой промышленности». – 2006. – № 3. – С. 52-60.

2 Квон В.Г. Программное обеспечение для расчета расхода метанола в шлейфах и установках комплексной подготовки газа северных месторождений / В.Г.Квон, В.А.Истомин // Особенности освоения газовых скважин в сложных геокриологических". – М.: изд-во ВНИИГаз, 1987. – С. 111-119.

3 Гурбанов А.Н. Разработка оптимального состава полипропиленгликоля и исследование его в качестве осушителя природного газа / А.Н.Гурбанов // Укр.НТЕ, Експрес-Новини: Наука. Техника. Виробництво. – 2008. – № 2. – С.58-59.

4 Брагинский О.Б. Нефтегазовый комплекс мира / О.Б.Брагинский. – М: Центр Лит НефтеГаз, 2006. – 640 с.

Стаття надійшла до редакційної колегії
22.01.13
Рекомендована до друку
професором ***Кондратом Р.М.***
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)
профессором ***Алиевым М.***
(НИПИнефтегаз, г. Баку)

УДК 51-74+536.423+504.3.054

ПРОЕКТУВАННЯ КОМП'ЮТЕРНОЇ СИСТЕМИ МОДЕЛЮВАННЯ ЗАБРУДНЕННЯ ПОВІТРЯ ВИПАРАМИ БУРОВОГО РОЗЧИНУ

[1]О.О. Попов, [2]Т.М. Яцишин

[1]Приватний вищий навчальний заклад «Європейський університет»,
10007 м. Житомир, просп. Миру, 59, тел. 0412-41-66-91, e-mail: sasha_popov1982@mail.ru

[2]ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 45369,
e-mail: yatsyshyn.t@gmail.com

Під час роботи бурової установки використовується буровий розчин, до складу якого входять речовини різного класу небезпеки: від 1-го (хромати, біхромати) до 4-го (сульфат натрію, диетиламін). Таким чином, промивальні рідини є токсичними і небезпечними для персоналу бурової і навколишнього середовища. Ці речовини потрапляють до атмосфери завдяки процесу випаровування з відкритих частин насосно-циркуляційної системи бурової установки.

Математичне моделювання різних чинників дає можливість визначити величину зони впливу досліджуваних об'єктів та ризики перебування в цій зоні. Запропоновано створення автономної комп'ютерної системи, яка повинна бути потужним інструментом для підтримки прийняття рішень відповідними управлінськими органами з метою забезпечення екологічної безпеки бурової.

Визначено основні вимоги до розроблюваної автономної спеціалізованої комп'ютерної системи. Розглянуті головні аспекти проектування та програмної реалізації даної комп'ютерної системи моделювання навантажень на атмосферу від випаровування компонентів бурового розчину з різних елементів бурової установки. Обґрунтовано вибір інструментів для вирішення поставленої задачі. Описано основні складові інтерфейсу системи.

Ключові слова: буровий розчин, випаровування, забруднення атмосфери, моделювання, інформаційно-комп'ютерна система, математико-логічна модель програми, інтерфейс.

В процессе работы буровой установки используется буровой раствор, в состав которого входят вещества различного класса опасности: от 1-го (хроматы, бихроматы) до 4-го (сульфат натрия, диэтиламин). Таким образом, промывочные жидкости являются токсичными и опасными для персонала буровой и окружающей среды. Эти вещества попадают в атмосферу в процессе испарени, из открытых частей насосно-циркуляционной системы буровой установки.

Математическое моделирование с помощью различных факторов позволяет определить величину зоны влияния исследуемых объектов и риски пребывания в этой зоне. Предлагается создание автономной компьютерной системы как мощного инструмента для поддержки принятия решений соответствующими управленческими органами в целях обеспечения экологической безопасности буровой.

Определены основные требования, предъявляемые к разрабатываемой автономной специализированной компьютерной системе. Рассмотрены главные аспекты проектирования и программной реализации данной компьютерной системы моделирования нагрузок на атмосферу от испарения компонентов бурового раствора из различных элементов буровой установки. Обосновано выбор инструментов для решения поставленной задачи. Описано основные составляющие интерфейса системы.

Ключевые слова: буровой раствор, испарения, загрязнение атмосферы, моделирование, информационно-компьютерная система, математико-логическая модель программы, интерфейс.

In the process of the drilling rig operation one uses the drilling mud that contains substances of different risk classes varying from Class 1 (chromates, bichromate) to the Class 4 (sodium sulfate, diethylamine). Thus drilling muds are toxic and dangerous to the drilling crew and the environment. These substances get into the atmosphere by evaporating from the external parts of pump-circulation system of the drilling rig.

With the help of different factors the mathematical modeling gives an opportunity to define the zone size of the investigated facilities and risks of being in this zone. This system must be a powerful tool for certain administrative authorities to take decisions with the purpose of providing the ecological safety around the drilling rig.

The major requirement to develop an autonomous computer system have been determined. We've considered major aspects of designing and program implementation of this computer system modeling the load on atmosphere because of evaporation of drilling mud components from different parts of the drilling rig. The selection of tools to solve the set problem has been proved. The characterisation of the major components of the system interface has been made.

Keywords: mud, evaporation, pollution of the atmosphere, modeling, information and computer system, mathematical and logical program model, interface .

Вступ. Вивчення якості повітря на території бурової установки є одним з актуальних завдан екологічної безпеки, оскільки воно безпосередньо пов'язано зі здоров'ям працівників бурової та населення прилеглих територій.

До основних джерел забруднення атмосферного повітря випарами бурового розчину (БР) на території бурової установки відносяться елементи жолобної системи, підняті на поверхню колони бурильних труб, та шламові амбари-

накопичувачі [0, 7]. Речовини потрапляють до атмосфери в процесі випаровування, який відбувається досить інтенсивно завдяки порівняно високій температурі промивальної рідини. Потім ці гази внаслідок турбулентної дифузії та під дією вітру розповсюджуються територією бурової та поза її межі, що створює великий ризик токсичного впливу на обслуговуючий персонал та населення прилеглих територій [6].

Шляхом математичного моделювання на основі екологічних даних, параметрів об'єктів бурової установки, складу використовуваних розчинів та реальних метеорологічних умов можна визначити величину зони впливу досліджуваних об'єктів та ризики перебування в цій зоні.

Моделюванням різних чинників можливо здійснювати комплексну оцінку території щодо її придатності під певні поставлені задачі, проводити районування, ранжування і прогнозування на основі певних рівнів забруднення або ризику [0].

В задачах комплексної оцінки стану навколишнього середовища визначну роль відіграють ГІС-технології, які допомагають управляти геоекологічною інформацією, здійснюють аналіз даних та забезпечують просторове подання досліджуваних об'єктів у вигляді електронних екологічних карт. ГІС включає набори сучасних інструментальних засобів для роботи з географічними та екологічними даними [0].

Базовим програмним забезпеченням ГІС є ArcGis фірми ESRI. ArcGIS – це інтегрований набір програмних ГІС-продуктів для певного кола задач.

Постановка задачі

В статті [0] вирішувалась задача побудови розподілів концентрацій випарів бурового розчину на території бурової установки шляхом математичного моделювання в Matlab 7.

Для проведення якісного математико-картографічного моделювання розповсюдження забруднюючих речовин (ЗР) в атмосфері, які випаровуються з різних ділянок бурової, та здійснення відповідного аналізу необхідно поєднати роботу математичної програмної системи (математичне моделювання) з картографічним пакетом (картографічне моделювання), наприклад ArcMap [0, 0].

Але використання екологічними службами цих програмних продуктів для забезпечення екологічної безпеки роботи бурової має значні обмеження, оскільки такий підхід вимагає підготовленості та обізнаності користувача щодо роботи з даними програмами, які за своєю структурою є досить складними (що вимагає значної кількості часу для їх освоєння). Як правило, більшість екологів не мають навичок роботи з цими комп'ютерними системами.

Зважаючи на це, було прийнято рішення про створення автономної спеціалізованої комп'ютерної системи моделювання навантажень на атмосферу від випаровування компонентів БР, що використовується у роботі бурової установки. Дана система буде потужним інструментом для підтримки прийняття рішень відповідними управлінськими органами з метою забезпечення екологічної безпеки бурової.

Ось вимоги, які висуваються до розроблюваної системи:

– можливість роботи програми на будь-якому ПК під управлінням ОС Windows (починаючи з версії 95) незалежно від наявності іншого спеціального програмного забезпечення (наприклад, Matlab, Mathcad, ArcMap тощо);

– простота та інтуїтивна зрозумілість інтерфейсу;

– наявність модуля математичного моделювання, який дасть можливість визначати розподіли концентрацій компонентів БР за різними сценаріями та методами;

– наявність модуля розрахунку ризиків токсичних ефектів для персоналу станції та населення прилеглих територій від небезпечного впливу парів БР;

– наявність модуля візуалізації, результатом роботи якого є електронна екологічна карта техногенних навантажень на досліджуваній території;

– наявність допоміжних модулів: введення вхідних даних, перевірки коректності введених даних, збереження вхідних даних;

– наявність бібліотеки математичних моделей та метеорологічних сценаріїв забруднення.

Оскільки вирішується задача створення комп'ютерної прогнозної системи для моделювання забруднення повітря випарами бурового розчину, то даний проект отримав назву **MAPEDF** (від англ. Modeling air pollution evaporations of drilling fluid).

Основні структурні елементи створюваної спеціалізованої комп'ютерної системи MAPEDF зображені на рис. 1.

У даній роботі розглянуто основні аспекти проектування та програмної реалізації MAPEDF. Обґрунтовано вибір інструментів для вирішення поставленої задачі.

Вирішення задачі

Вирішення задачі розпочнемо з дослідження інструментів для її виконання. В даному випадку основними інструментами для вирішення задачі є мова, технологія та середовище програмування.

Проведено дослідження мов програмування високого рівня та відповідних середовищ програмування, що забезпечують високу швидкість проведення математичних операцій, дають можливість створити зручний інтерфейс користувача, програмні додатки яких можуть автономно працювати на будь-якому ПК з операційною системою Windows.

Мови програмування високого рівня дозволяють писати програми в формі, більш наближеній до звичайної мови. Програма, написана мовою високого рівня, є більш зрозумілою, і її можна модифікувати, що значно полегшує роботу програміста порівняно з написанням машинного коду.

Важливою особливістю мов високого рівня є їх відносна незалежність від машини. Це

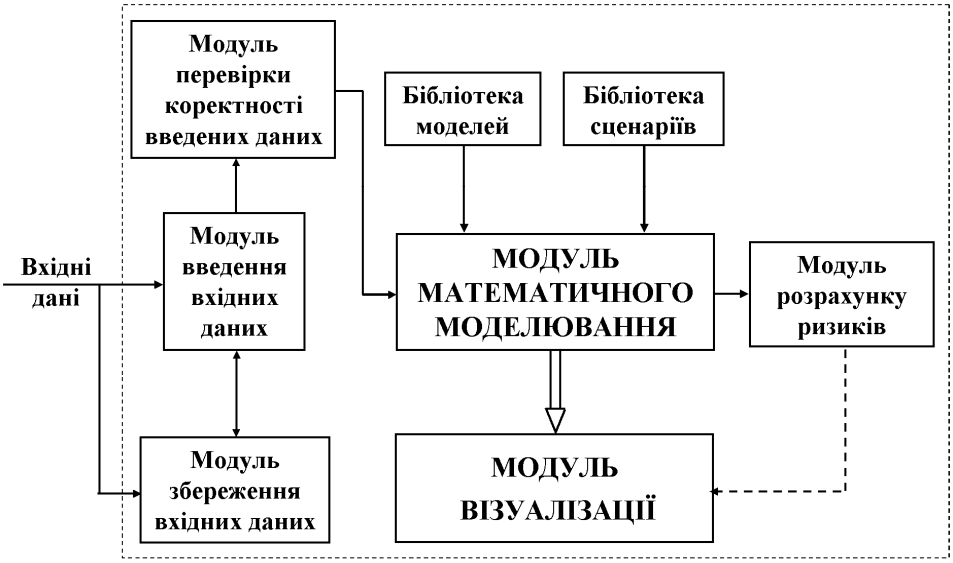


Рисунок 1 – Модульна структура комп'ютерної системи MAPEDF

означає, що правила запису програм не залежать або мало залежать від особливостей конкретної ЕОМ (ПК). Тоді для перенесення програми на іншу машину програму не обов'язково переписувати заново, достатньо лише віддтранслювати її в коди, специфічні для цієї машини. Тому вибір однієї з мов програмування високого рівня для вирішення конкретної задачі є очевидним. Для розроблення даного програмного продукту було вирішено використати Borland C++ Builder 6.0. Для розроблення зручного інтерфейсу було використано бібліотеки основних класів Borland C++ Builder 6.0, що підтримує простоту та надійність роботи з таблицями, графічною та текстовою інформацією.

Для отримання математичних даних розподілів концентрацій ЗР на досліджуваних територіях здійснюється математичне моделювання на основі розроблених авторами моделей [0].

Вхідними даними моделей є параметри джерела забруднення, метеорологічні параметри та характеристики бурового розчину. Більш детальна структура вхідних даних буде розглянута при описі роботи MAPEDF.

Роботу над проектом розпочнемо зі створення UML діаграми невізуальних класів, а саме тих, які описують вхідні і вихідні дані MAPEDF. Крім того, для чіткого розуміння логічної структури математичної частини проекту на UML діаграмі зобразимо зв'язки між класами. Створена UML діаграма зображена на рис. 2.

Розглянемо коротко кожний з класів:

1) Клас TWind описує режим вітру.

2) Клас TMeteorology описує метрологічні умови, які впливають на процес розповсюдження забруднення в атмосфері.

3) Клас TPointSource описує параметри бурильних труб.

4) Клас TLineSource описує параметри жалобної системи.

5) Клас TPlanarSource описує параметри шламових амбарів.

6) Клас TMixtureElement описує параметри складових бурового розчину.

7) Клас TMixture описує склад та параметри бурового розчину.

8) Клас TRisk описує коефіцієнти та функції для визначення ризиків.

9) Клас TMap описує параметри картографічного зображення.

10) Клас TModel описує всі параметри моделі для даної задачі: сценарії, карту, дані про джерела забруднення, метрологічні дані, сіткуматрицю результатів моделювання тощо.

Згідно з концепцією ООП кожен клас, крім даних, містить методи для їх обробки. Наприклад, клас TModel містить 7 методів Run1 – Run7 для отримання результатів моделювання для кожних з 7 сценаріїв (Середнє забруднення за період, Максимальне забруднення, Аварійне моделювання, Аномальна конвекція, Аномальний штиль, Нормальний штиль, Вибіркове забруднення), методи для задання вхідних даних: SetSource, SetScenario і т.д.

Після програмної реалізації всіх вищеописаних класів, яка завдяки створеній UML діаграмі звелася лише до написання коду методів класів, перейдемо до опису розробленого інтерфейсу користувача.

Враховуючи специфіку вирішуваної задачі, основні елементи управління помістимо в єдину (головну) форму з трьома закладками: „Вхідні дані" (рис. 3), „Результати моделювання" (рис. 4), „Перелік речовин для розчинів та інші додаткові параметри" (рис. 5).

У верхній частині інтерфейсу розміщено наступні допоміжні меню з відповідними командами:

1. „Файл" – для роботи з файлами: відкриття нового або завантаження раніше збереженого файлу з вхідними даними, збереження файлу з вхідними даними, збереження результату моделювання, закриття програми MAPEDF.

2. „Вибір моделі" – для вибору потрібної математичної моделі для обчислення рівнів

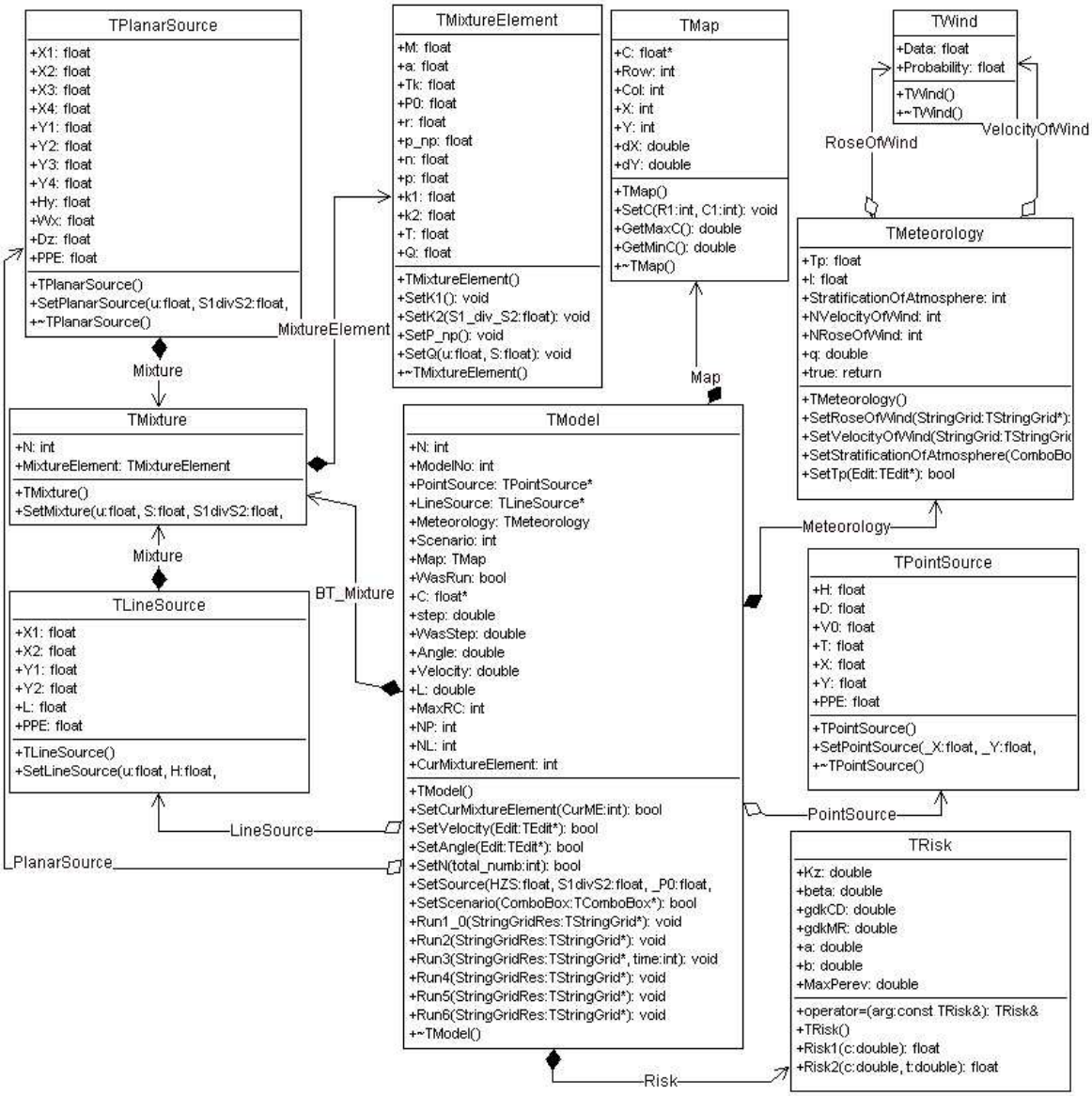


Рисунок 2 – UML діаграма невізуальних класів проекту MAPEDF

концентрацій парів вибраного компоненту бурових розчинів в приземному шарі атмосфери на території бурової.

3. „Допомога” – містить форму „Про програму” та форму „Допомога (параметри вводу)” (рис. 6) для пояснення параметрів, які необхідно ввести у відповідних полях закладки "Вхідні дані" для схематичного зображення досліджуваних джерел забруднення.

Опишемо головну форму. Інтерфейс закладки „Вхідні дані” змінюється в процесі виконання програми в залежності від вибраного сценарію забруднення, оскільки моделювання для кожного з них вимагає використання деяких специфічних метеорологічних даних. Наприклад, для сценарію „Вибіркове забруднення” потрібно задавати лише один напрямок вітру і фіксовану його швидкість, а також один стан атмосфери. А для сценарію „Середнє забруднення за період”, враховуючи випадковий характер метеорологічних даних, необхідно вказувати імовірнісні розподіли цих параметрів.

Також у відповідних полях даної закладки вводяться параметри досліджуваної території, дані щодо джерел забруднення та склад розчинів, випаровування яких досліджується.

Закладка „Результати моделювання” містить поле для візуалізації результатів моделювання, а також поля та кнопки для налаштування її параметрів.

Інтерфейс закладки „Перелік речовин для розчинів та інші додаткові параметри” містить такі елементи:

– певні параметри компонентів бурових розчинів, які зберігається у відповідній базі даних;

– кнопки для редагування даного списку;

– допоміжна інформація про використані змінні, а також поля для деяких параметрів, необхідних для моделювання.

На рис. 6 показано параметри, які необхідно ввести для схематичного відображення на карті відповідних шламових амбарів та ділянок жолобної системи.

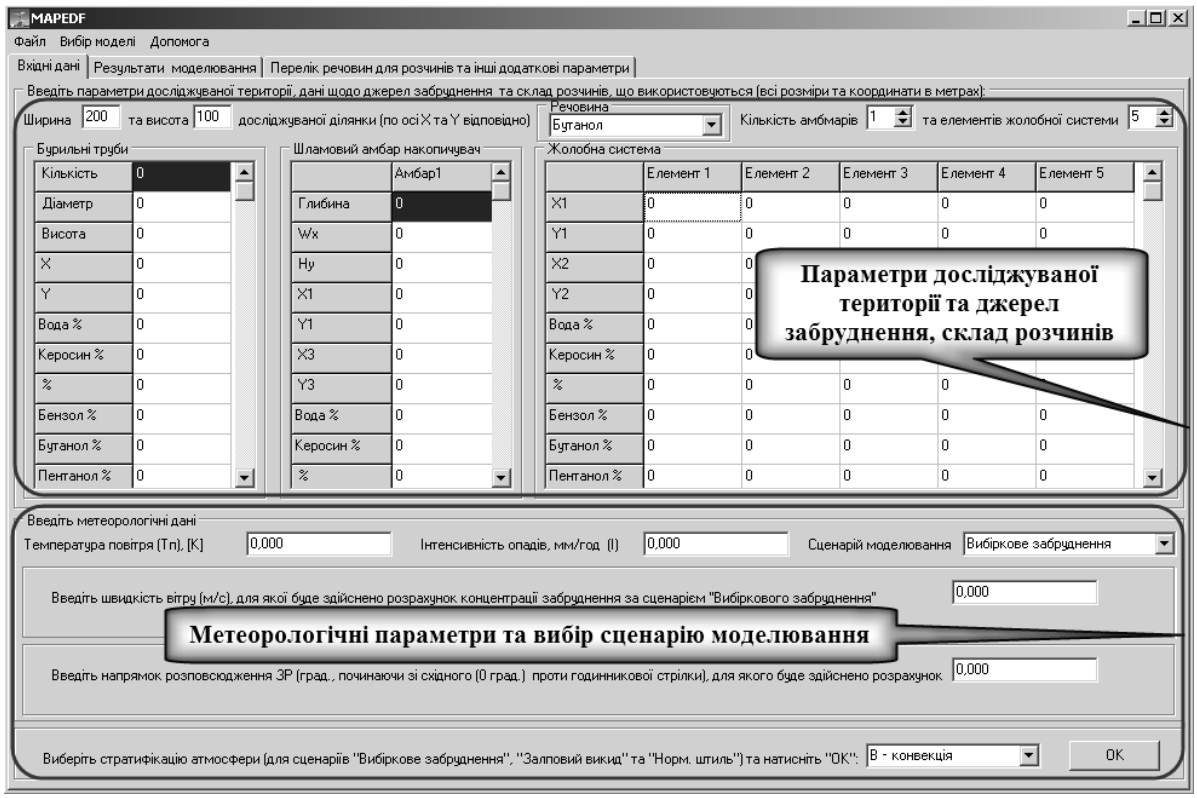


Рисунок 3 – Закладка „Вхідні дані” головної форми проекту MAPEDF

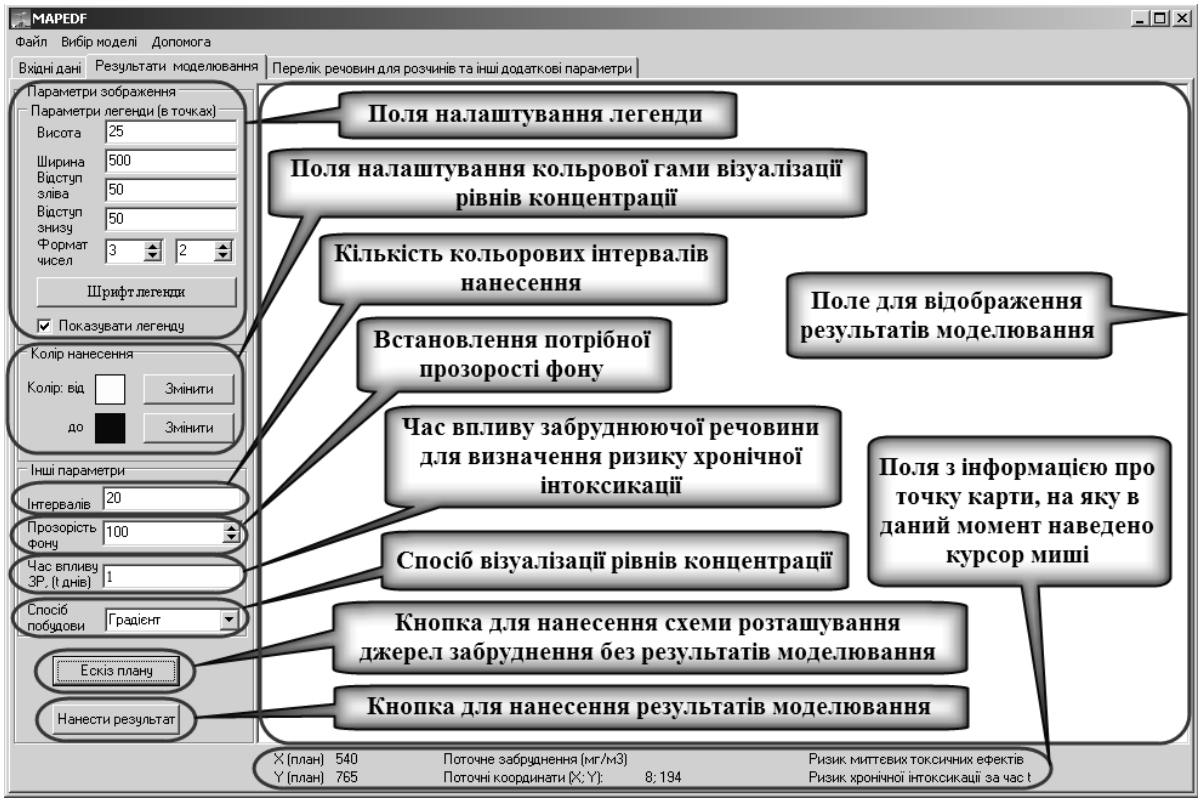


Рисунок 4 – Закладка „Результати моделювання” головної форми проекту MAPEDF

Виходячи з вищесказаного та проведеного тестування програми (яке докладно буде описане в наступних роботах), можна зробити висновок, що створений програмний продукт задовольняє всі вимоги, які до нього висувалися.

На рис. 7 зображена іконка програми MAPEDF.

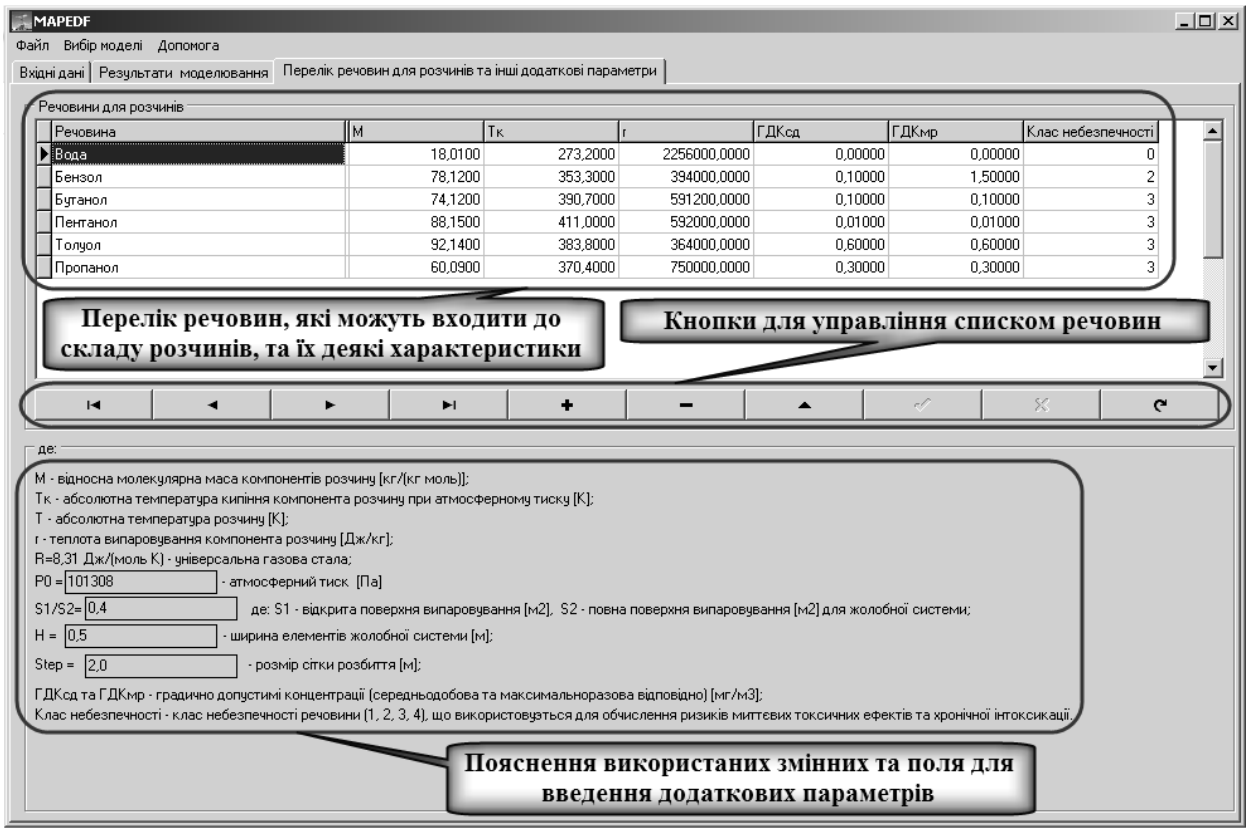


Рисунок 5 – Закладка „Перелік речовин для розчинів та інші додаткові параметри" головної форми проекту MAPEDF

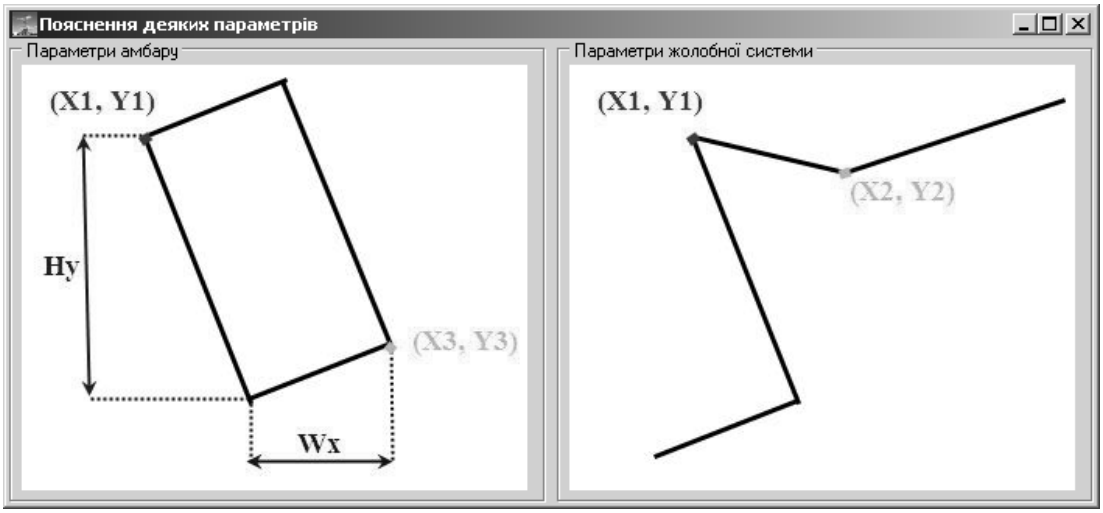


Рисунок 6 – Форма MAPEDF з поясненнями деяких параметрів



Рисунок 7 – Іконка програми MAPEDF

Висновки

Проведено дослідження інструментів для створення комп'ютерної прогнозної системи для моделювання забруднення повітря випарами бурового розчину. Розроблено математико-логічну модель програми у вигляді UML діаграми та інтерфейс користувача програми. Реалізовано створення програми MAPEDF.

Тестування програми, довело, що програма відповідає всім висунутим вимогам. Розробле-

ний програмний продукт дозволяє проводити математико-картографічне моделювання за різними метеорологічними сценаріями для різних схем розташування джерел забруднення.

Література

1 Каменева И.П. ГИС-технологии построения экологических карт статистических поверхностей / И.П. Каменева, А.В. Яцишин, Д.А. Полишко, А.А. Попов, Бахурець Т.В. // Збірник наукових праць Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова. – К.: ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова НАН України, 2008. – № 49. – С. 81–88.

2 Каменева И.П. Математико-картографическое моделирование техногенных нагрузок на атмосферу / И.П. Каменева, А.А. Попов, А.В. Яцишин // Моделювання та інформаційні технології: збірник наукових праць. – К.: ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова НАН України, 2009. – № 51. – С. 58-64.

3 Попов О.О. Математичне моделювання розповсюдження техногенного забруднення від підприємств паливної енергетики / О.О.Попов // Збірник наукових праць Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова. – К.: ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова НАН України, 2009. – Вип. 51. – С. 73-84.

4 Попов О.О. Стохастична модель забруднення приземної атмосфери від підприємств паливної енергетики (на прикладі ТЕЦ) / О.О. Попов // Збірник наукових праць ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова НАН України. – 2009. – Вип. 53. – С. 10–21.

5 Шкіца Л.Є. Дослідження забруднення атмосфери випарами бурового розчину / Л.Є. Шкіца, Т.М. Яцишин // Збірник наукових статей “ІІІ-го Всеукраїнського з’їзду екологів з міжнародною участю”. – Вінниця, 2011. – Том.2. – С. 554-557.

6 Шкіца Л.Є. Математичне моделювання забруднення приземного шару атмосфери парами бурового розчину / Л.Є. Шкіца, Т.М. Яцишин, О.О. Попов // Науковий вісник ІФНТУНГ. – 2012. – № 3 (33). – С. 56-62.

7 Яцишин Т.М. Дослідження впливу основних технологічних операцій процесу буріння нафтогазових свердловин на атмосферне повітря / Т.М. Яцишин, В.М. Савик // Збірник наукових праць ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова НАН України. – 2012. – № 62. – С. 54-59.

Стаття надійшла до редакційної колегії 06.02.13
Рекомендована до друку професором ***Шкіцею Л.Є.*** *(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ) професором* ***Мальованим М.С.*** *(НУ «Львівська політехніка», м. Львів)*

УДК 62-503.57:621.6-52

СИНТЕЗ NEURO-FUZZY-КОНТРОЛЕРІВ ДЛЯ КЕРУВАННЯ РОБОТОЮ ГПА

[1]М.І. Когутяк, [1]В.С. Борин, [1]Л.І. Швець, [2]Т.Т. Кондрат, [3]О.Б. Василенко

[1] ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 504521, e-mail: kafatp@ukr.net

[2] ООО "Питергазморпроект", 95006, Сімферополь, вул. Р. Люксембург, 17, тел. 050 6177268, e-mail: kondratt@ukr.net

[3] НДПІ ПАТ "Укрнафта", 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Північний бульвар, 2, тел. (0342) 776140, e-mail: felix122@rambler.ru

Питання синтезу систем автоматичного керування газоперекачувальними агрегатами магістральних газопроводів на засадах нечіткого логічного виводу та нейромережевого інструментарію з метою забезпечення найкращої якості регулювання, зокрема з врахуванням впливу на динаміку регулювання прилеглих ділянок газопроводу залишається на даний час актуальною і мало дослідженою проблемою, незважаючи на ідеї та теоретичні напрацювання, закладені в діючі штатні системи агрегатної автоматики. Для одного з основних регульованих параметрів компресорного агрегату синтезовані системи регулювання з використанням класичного регулятора, гібридного контролера з нечітким логічним виводом та нейроконтролера з лінеаризацією відгуку. Проведено аналіз роботи досліджуваних систем керування за результатами імітаційного моделювання для різних типів збурюючих чинників та зроблено висновки про границі і їх застосування на реальних об'єктах .

Ключові слова: імітаційна модель, нечіткий логічний вивід, нейроконтролер.

Вопрос синтеза систем автоматического управления газоперекачивающими агрегатами магистральных газопроводов по принципу нечёткого логического вывода и нейросетевого инструментария с целью обеспечения наилучшего качества регулирования, в частности с учетом влияния на динамику регулирования прилегающих участков газопровода остается в настоящее время актуальной и малоисследованной проблемой, несмотря на наличие идеи и теоретических наработок, заложенных в действующие штатные системы агрегатной автоматики. Для одного из основных регулируемых параметров компрессорного агрегата синтезированны системы регулирования с использованием классического регулятора, гибридного контроллера с нечетким логическим выводом и нейроконтроллера с линеаризацией отзыва. Проведен анализ работы исследуемых систем управления по за результатам имитационного моделирования для разных типов возмущающих факторов и сделаны выводы о пределах их использования на реальных объектах.

Ключевые слова: имитационная модель, нечеткий логический вывод, нейроконтроллер.

The problem of automatic control systems synthesis of main gas pipelines compressor units based on the principles of indistinct inference and neural network tools with the aim to provide the best quality control remains vital and researched a little at present, especially considering the influence on dynamics control of the adjacent areas on the pipeline, despite the ideas and theoretical developments which are the basis of functioning aggregate automation systems. For one of the main adjustable parameters of compressor unit control systems are synthesized with the use of the classic controller, hybrid controller with indistinct inference and neurocontroller with linearization feedback. The analysis of the researched systems work according to the results of simulation modeling for different types of disturbing factors is conducted and conclusion on the limits of their performance on real objects are drawn.

Keywords: simulation model, indistinct inference, neurocontroller.

Вступ

Системи автоматичного керування газоперекачувальними агрегатами (САК ГПА) магістральних газопроводів є важливою складовою безаварійної роботи компресорних агрегатів у складі компресорних станцій (КС) магістральних газопроводів. Відомі розробки систем САК ГПА і автоматизованих систем керування компресорними цехами (АСК КЦ) на базі сучасної мікропроцесорної техніки [1-4].

До складу типової САК ГПА з газопровідними двигунами входить контур керування за основним параметром, контури керування за обмежувальними параметрами та антипомпажний регулятор. За основні параметри регулювання приймають: тиск на виході нагнітача, об'ємну витрату через нагнітач, частоту обертання силової турбіни газотурбінного двигуна (ГТД) тощо. Керувальною дією в цих системах є подача паливного газу в камеру згоряння ГТД. В разі вибігу обмежувальних параметрів (температура димових газів на викиді з ГТД, частота обертання турбіни високого чи середнього тиску ГТД, тиск за осьовим компресором ГТД, температура компримованого газу на виході з нагнітача, тощо) за встановлені межі здійснюється ручний або автоматичний перехід до керування за обмежувальним параметром. В [1] запропонована адаптивна САК ГПА зі зміною структури контура керування та алгоритмом перемикання з основного параметра на обмежувальний. У випадку появи помпажних

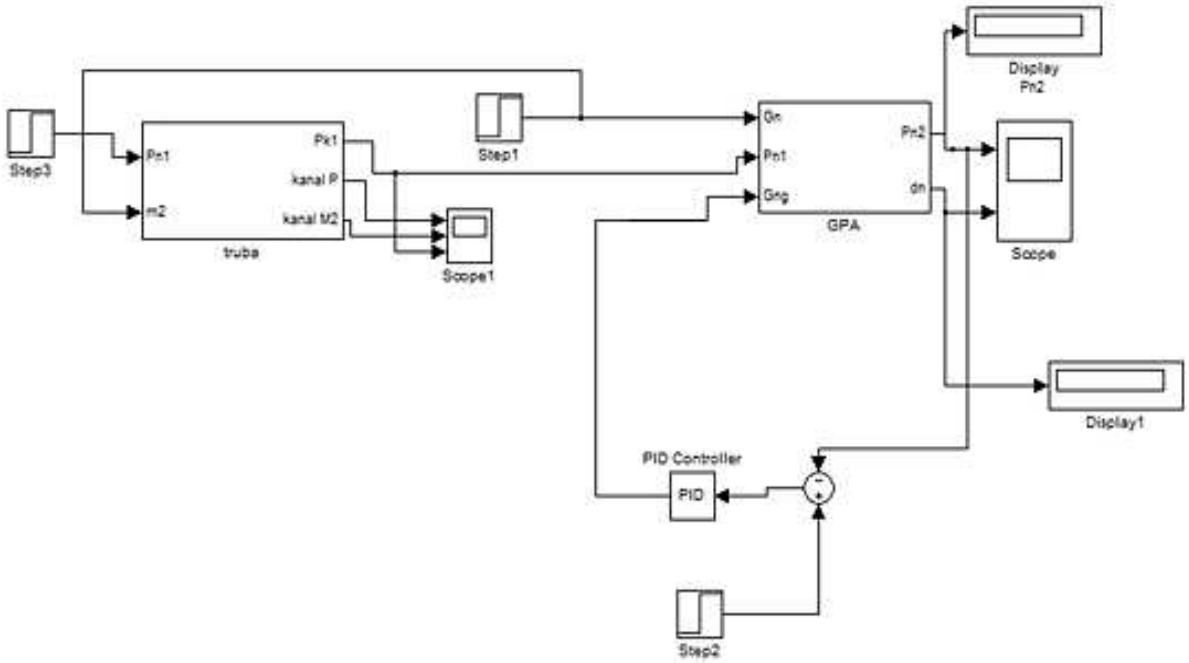


Рисунок 1 – Структура Simulink-моделі АСК ГПА з прилеглою ділянкою трубопроводу та традиційним ПІД-контролером

явищ в нагнітачі спрацьовує система антипомпажного регулювання клапаном на байпасній лінії ГПА. В більшості систем штатної автоматики передбачена функціональна взаємодія обох контурів керування.

Однак, актуальною залишається задача створення автоматичних оптимальних та адаптивних систем керування процесом компримування природного газу. В наукових публікаціях не достатньо уваги приділено синтезу АСК ГПА з використанням сучасних технологій керування з використанням систем нечіткого виводу та нейромереж. Також не подаються результати аналізу якості роботи таких систем, коли необхідно розглядати компресорну станцію як динамічну систему, яка складається із паралельно з'єднаних газоперекачувальних агрегатів, до яких через прилеглий трубопровід подається природний газ під певним тиском і з певною температурою.

Тому актуальним є проведення подібних досліджень з метою синтезу ефективних систем керування ГПА.

Постановка завдання

Метою роботи є синтез контролерів з використанням систем нечіткого виводу та нейромереж для САК ГПА з прилеглою ділянкою трубопроводу та аналіз їх роботи в умовах дії на керований об'єкт різноманітних збурень. Дослідження проводяться із залученням методів математичного та імітаційного моделювання з використанням апарату нечіткого логічного виводу та нейромереж.

Результати

Попередніми етапами досліджень є створення адекватної технологічному процесу компримування природного газу імітаційної моделі ГПА з прилеглою ділянкою трубопроводу, та проведені дослідження її динаміки з врахуванням різноманітних збурюючих чинників. Теоретичні засади, структури математичних моделей, симуляційні моделі та результати імітаційного моделювання подаються в роботах[5-9]. Основою для синтезу та дослідження САК ГПА є отримані результати дослідження динамічних властивостей системи «прилеглий трубопровід – ГПА» з використанням випробуваної імітаційної моделі є.

В роботі проведені дослідження САК ГПА, де за основний регульований параметр вибраний тиск на виході відцентрового нагнітача природного газу P_{n2}, а керувальною дією є подача паливного газу в камеру згоряння G_{ng}. Структура системи з традиційним ПІД - контролером зображено на рис. 1.

Налаштування регулятора здійснювалось засобами пакета Simulink програмного продукту Matlab з використанням блоку параметричної оптимізації.

Відтак традиційний ПІД-контролер замінювався на Fuzzy-PID-контролер та адаптивний Neuro-контролер.

Нейромережеві та нечіткі логічні регулятори можуть використовуватись не тільки для об'єктів, із суто якісними характеристиками: світова практика свідчить, що і у випадку математично описаних об'єктів вищезазначені регулятори діють краще за звичайні [12].

Під нечітким керуванням (Fuzzy Control, FC) розуміється область застосування загальної методології теорії нечітких множин і нечіткої логіки для розв'язання практичних завдань керування [11]. Нечітке керування виникло як технологія, що здатна розширити можливості автоматизації виробництва і призначена для розв'язання прикладних задач в області керу-

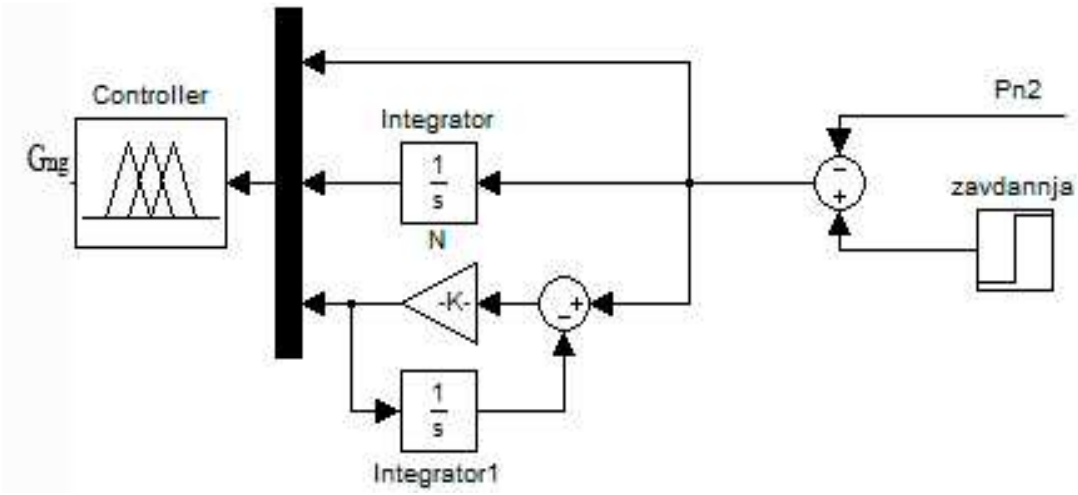


Рисунок 2 – Модель Fuzzy-PID-контролера

вання, котрі в загальному випадку можуть бути реалізовані за допомогою програмованих контролерів. Структура Fuzzy-PID-контролер зображено на рис. 2.

Синтезований Fuzzy-PID-контролер має вхідну частину, яка формує складові традиційного ПІД-контролера (розузгодження, інтегральна та диференційна компоненти) та власне Fuzzy-блок з системою нечіткого логічного виводу. Диференційна складова відтворює реальну диференційну ланку, що включає також фільтр низької частоти.

Для реалізації процесу нечіткого виводу в середовищі Matlab існує спеціальний пакет розширень Fuzzy Logic Toolbox. В умовах цього пакету користувач може виконувати необхідні дії: синтез і використання нечітких моделей. Розроблення Fuzzy-регулятора є складним і тривалим процесом. Цей процес потребує особливої уваги та зосередження на використанні практичних знань експерта в прикладній галузі і складається з пов'язаних між собою етапів – кроків проектування на стадії синтезу та дослідження:

Формалізація поставленої задачі: визначення змінних, уставлення словесного опису з конкретними фізичними значеннями;

Розробка бази правил, що визначають стратегію управління: введення фазі-правил і задання методу дефазіфікації вихідних даних;

Оптимізація розроблюваної системи в режимі off-line: інтерактивний аналіз поведінки системи з використанням наперед підготовлених даних або за допомогою програмної моделі об'єкта управління.

Нечіткий процес виводу містить: функції належності, нечіткі логічні оператори, правила імплікації. Як зазначається в роботі [10], існує два типи нечітких інференц - систем (систем виводу), що можуть бути реалізовані в нечіткому логічному інструментарії - *Mamdani*-тип і *Sugeno*-тип.

Складність і тривалість процесу налаштування Fuzzy-PID-контролера (три складові) значно стримує практичне застосування контролера з базою знань, яка формується експертами з автоматизації. Очевидно, що у цьому випадку доцільно застосувати технології, які спрощують процедуру синтезу та налаштування контролера з нечітким виводом.

Теоретично, системи з нечіткою логікою та штучні нейронні мережі еквівалентні одне одному, однак на практиці у них існують свої власні переваги та недоліки. Дане міркування стало в основу апарату гібридних мереж, де виводи робляться на основі апарату нечіткої логіки, але відповідні функції належності підлаштовуються з використанням алгоритмів навчання нейронних мереж.

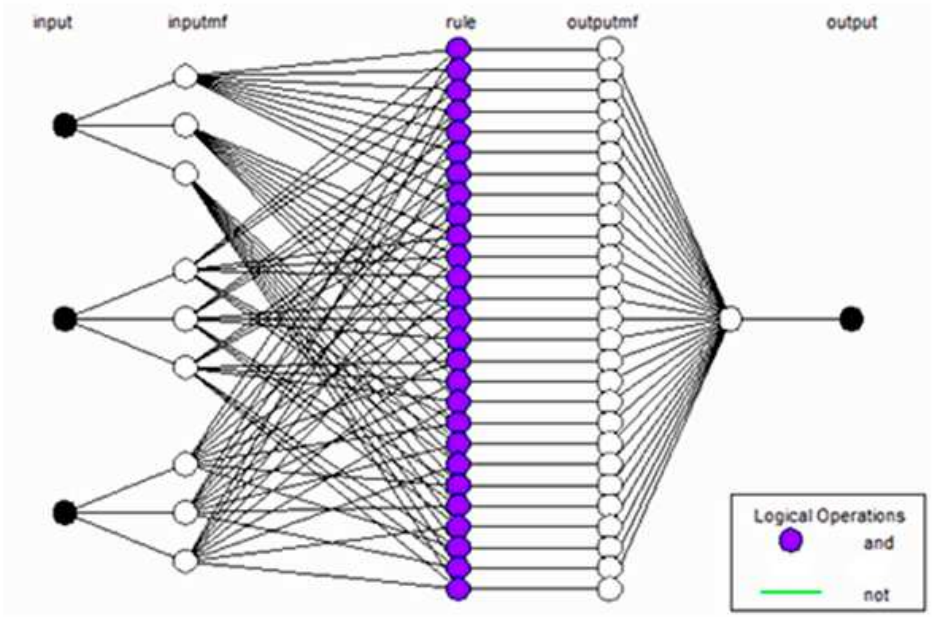
Гібридна мережа – це багатошарова нейронна мережа спеціальної структури без зворотних зв'язків, в якій використовуються звичайні сигнали, ваги та функції активації, а виконання операцій сумування базується на використанні фіксованої норми. При цьому значення входів, виходів і ваг гібридної нейронної мережі - це реальні числа з проміжку [0,1].

Основна ідея, що покладена в основу моделі гібридних мереж, полягає використанні існуючої вибірки даних для визначення параметрів функції належності, які якнайкраще відповідають деякій системі нечіткого виводу. При цьому для знаходження параметрів функції належності використовуються відомі процедури навчання нейронних мереж. Типовим представником нечітких нейромереж є мережа ANFIS.

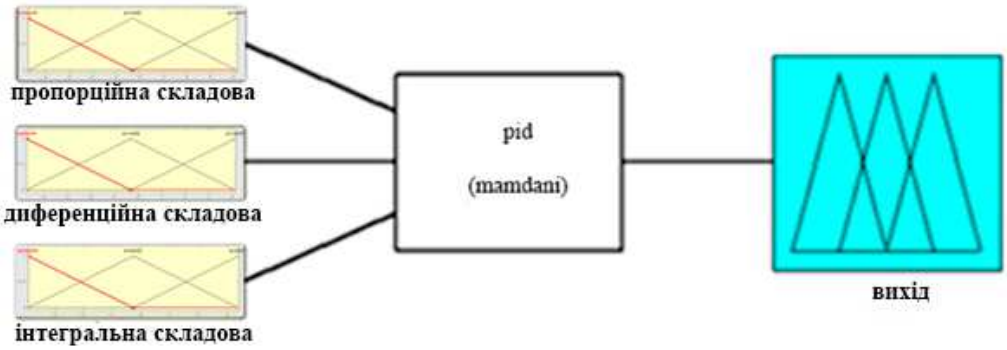
З одного боку, гібридна мережа ANFIS – це нейронна мережа з одним виходом і декількома входами, що є нечіткими лінгвістичними змінними. При цьому терми вхідних лінгвістичних змінних описуються стандартними для системи функціями належності, а терми вихідної змінної подаються лінійною чи постійною (сталою) функцією належності (Sugeno type).

З іншого боку, гібридна мережа ANFIS є системою нечіткого виводу FIS типу Сугено першого чи нульового порядку, в якій кожне з правил нечітких продукцій має постійну вагу рівну одиниці [4].

В середовищі Matlab мережа ANFIS застосована для синтезу та налаштування Fuzzy-PID-



а)



б)

Рисунок 3 – Структура ANFIS- мережі а) та системи нечіткого виводу (Fuzzy Inference System) для Fuzzy-контролераб)

контролера. Створення структури, налаштування параметрів та перевірка здійснюється за вибірками (набором даних) – навчальною, перевірочною та тестуючою, які попередньо подаються у вигляді файлів баз з розділювачами - табуляціями (pd_train.dat, pd_check.dat, pd_test.dat), перші стовпці яких містять дані про числові вхідні змінні в часі, а останній – вихідні. Ці файли сформовані і записані в ручному режимі з вибірок даних, отриманих під час моделювання в Simulink САК ГПА з використання традиційного ПІД-контролера (вхідні значення: розузгодження, інтегральна та диференційна складові в часі, вихідна – керувальний вплив контролера). Навчальна та перевірочна вибірки безпосередньо застосовані в процесі налаштування параметрів гібридної мережі [10]. Після тестування гібридний Fuzzy-PID-контролер вважається синтезованим та налаштованим і може використовуватись для аналізу роботи АСК в середовищі симуляції. Результати синтезу контролера подані на рис. 3.

Штучні нейронні мережі (НМ) добре підходять для завдань розпізнавання образів. Вони можуть автоматично набувати знання, але процес їх навчання часто є надто тривалим, а аналіз навчання мережі вельми складним (навчена мережа для користувача зазвичай подається як “чорна скриня”). При цьому будь-яку апріорну інформацію (знання експерта, досвід роботи) для прискорення процесу навчання в нейронну мережу ввести неможливо.

Штучні нейронні мережі дуже успішно застосовуються при ідентифікації і керуванні динамічними системами. Універсальні можливості ап.роксимації багатошарових перцептронів є гарним показником для синтезу нелінійних систем і для створення багатоцільових нелінійних контролерів. В середовищах розробки існує три основних мережних архітектури сучасних нейромережевих контролерів (НК) для реалізації процесу керування [11]:

– модельне керування з прогнозуванням (Predictive model control);

– модельне керування лінеаризації відгуку (NARMA-L2 control);

– модельне керування посиланням (Reference model control).

Для реалізації процесу керування з використанням нейромереж існує два основних етапи:

1) системна ідентифікація;

2) проект і конструкція керування.

В процесі системної ідентифікації розробляється нейронна коміркова модель об'єкта, яким в майбутньому планується керувати. На етапі проекту керування використовується нейромережева модель об'єкта, для якої коректно синтезувати і навчати контролер. У кожній з трьох поданих архітектур керування системна ідентифікація подібна, а етап проекту керування є відмінним [12].

Для модельного керування з прогнозуванням модель об'єкта використовується для визначення майбутніх властивостей об'єкта, а як алгоритм оптимізації використовується вибір вхідного сигналу керування, що оптимізує майбутню діяльність. Для модельного керування посиланням контролер застосовується, ця нейромережа навчена керувати об'єктом так, щоб якнайточніше досягти характеристик еталонної моделі

В модельному керуванні з прогнозуванням контролер використовує нейронну коміркову модель, щоб прогнозувати реакції об'єкта на потенційні контрольні сигнали, а алгоритм оптимізації обчислює контрольні сигнали, що оптимізують майбутню діяльність об'єкта. Нейромережева модель об'єкта навчається автономно, у пакетній формі, використовуючи кожний з навчальних алгоритмів. Однак це вимагає істотної кількості взаємозалежних обчислень, тому що кожен алгоритм оптимізації має свій час виконання для проведення обчислення входу оптимального керування.

Керування лінеаризацією зворотного зв'язку (лінеаризацією відгуку) чи NARMA-L2 керування, а нейроконтролер, в свою чергу, має назву NARMA-контролер. Головна ідея, покладена в основу створення такого типу контролера, полягає втому, щоб спрощуючи нелінійність перетворити нелінійну системну динаміку в суто лінійну[13]. В NARMA керуванні нейромережевий контролер потребує найменшої кількості обчислень: він є нейромережевою перебудовою моделі об'єкта, що навчена автономно.

В керуванні посиланням інтерактивне обчислення контролера, як і NARMA методики, є мінімальним. Навчання контролера в обчислювальному відношенні є досить витратним та вартісними, оскільки вимагає використання динамічного зворотного поширення. Перевагою цього методу є те, що модельне керування посиланням можна застосувати до більшого класу об'єктів, аніж керування NARMA.

Всі види модельного керування знайшли відображення в нейромережевих контролерах, які реалізовані в програмному середовищі моделювання Matlab Neural Network і можуть бути використані в Simulink, а також програмуватись та навчатись. Попередній аналіз методів проектування нейроконтролерів свідчить про доцільність застосування керування з лінеаризацією відгуку для синтезу регулятора САК ГПА.

Як і при модельному керуванні з прогнозуванням, першим кроком у процесі використання керування лінеаризації відгуку є ідентифікація об'єкта керування. Навчається НМ для того, щоб представити пряму динаміку системи. На першому кроці обирається структура моделі. Еталонна модель, що використовується в процесі для подання загальних дискретних в часі нелінійних систем, – це модель нелінійного авторегресивного середнього значення, що переміщується (NARMA):

$$y(k+d) = N\big[y(k), y(k-1),..., y(k-n+1), u(k), u(k-1),..., u(k-n+1)\big], \quad (1)$$

де u(k) – системний вхід;

y(k) – системний вихід;

N – ідентифікуюча процедура, що використовується в прогнозуючому контролері.

Дещо змінений спосіб запропонували вчені Нарендра та Макхопадхай [13]: щоб коректно представити систему алгоритм повинен використовувати приблизні моделі. Тоді контролер, що розглядається, використовує модель:

$$u(k+d) = f\big[y(k), y(k-1),..., y(k-n+1), u(k), u(k-1),..., u(k-n+1)\big] + g\big[y(k), y(k-1),..., y(k-n+1), u(k), u(k-1),..., u(k-n+1)\big]\cdot u(k+1) \quad (2)$$

де f та g – приблизні моделі апроксимації.

Використовуючи модель NARMA-L2 можна отримати алгоритм:

$$u(k+1) = \{y_r(k+d) - f\big[y(k),..., y(k-n+1), u(k),..., u(k-n+1)\big]\} \times \{g\big[y(k),..., y(k-n+1), u(k),..., u(k-n+1)\big]\}^{-1}. \quad (3)$$

На рис. 4 зображено блок-схему алгоритму навчання моделі з NARMA-контролером.

Синтез контролера лінеаризації відгуків NARMA в середовищі Simulink проводиться з використанням бібліотеки нейромережевого інструментарію MATLAB NeuralNetwork.

Контролер активується першим запуском (подвійне натискання на ярлику блоці NARMA-L2 Controller), після чого відкривається вікно модельної ідентифікації (Plant Identification) проектування NARMA контролера. Процес налаштування має лише один етап, тому що контролер визначається безпосередньо з моделі. Вікно Plant Identification розбите на три функціональні області: архітектура мережі, навчальні дані та навчальні параметри. Розмір прихованого рівня, число вхідних та вихідних затримок задається в першому блоці даного вікна (Network Architecture).

В блоці навчальних даних (Training Data) визначаються та вводяться такі параметри, як кількість навчальних вибірок, максимальна та мінімальна межі входів та виходів нейромережевої моделі та вказується еталонна модель об'єкта, яка буде використовуватись НМ для навчання контролера.

Внутрішня структура NARMA контролера та його підключення до стимуляційної моделі об'єкта зображена на рис. 5.

Далі генерується навчальна вибірка даних, із використанням серії випадкових вхідних впливів, та фіксується реакція моделі. Дані приймаються та заносяться в мережу. Отримані

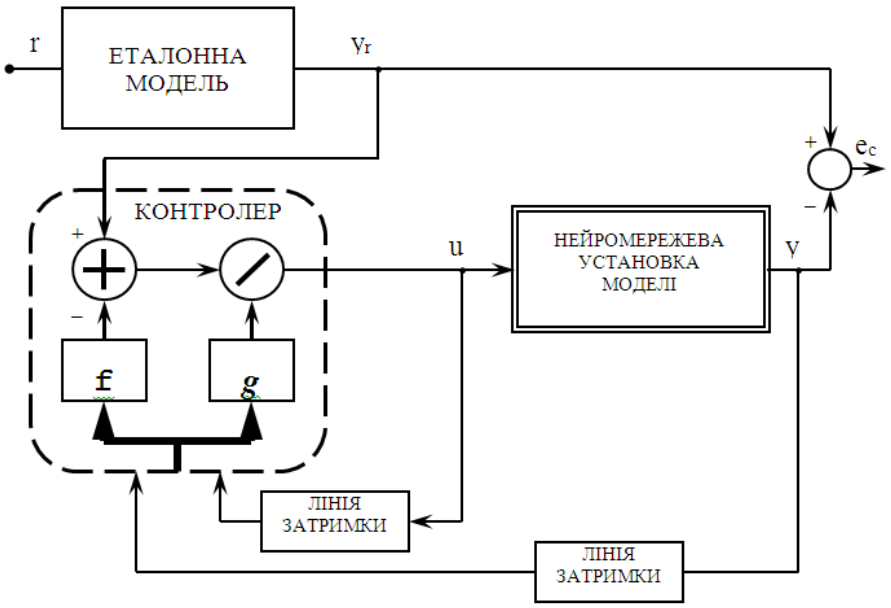
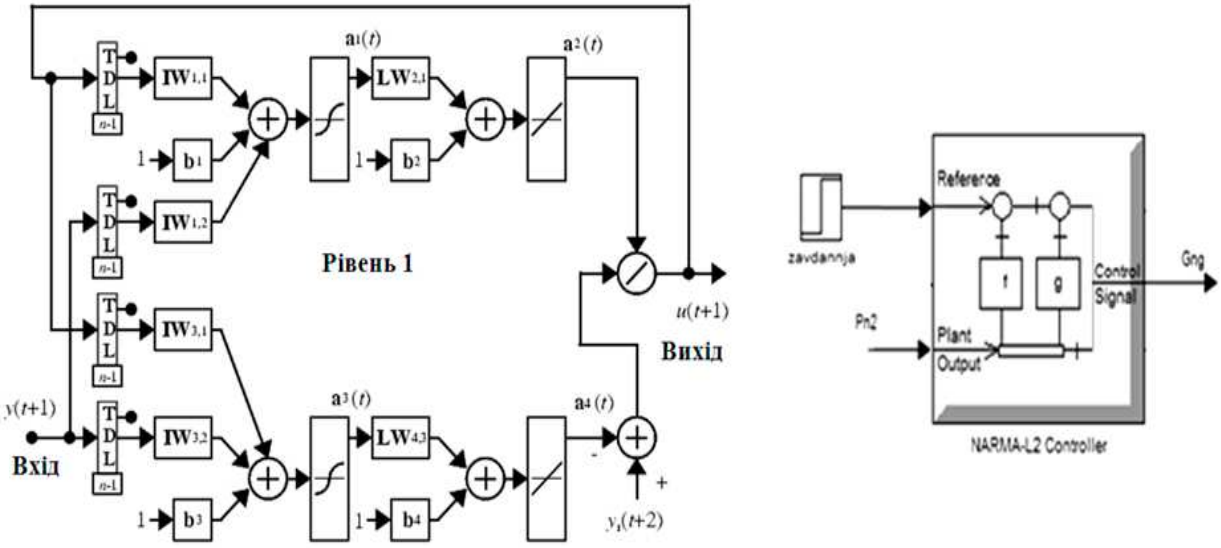


Рисунок 4 – Структура алгоритму навчання нейромережевої моделі з NARMA контролером



а) б)

Рисунок 5 – Структура нейронної мережі NARMA контролера (а) та його підмикання до моделі об'єкта (б)

дані зберігаються в файлах бази даних для подальшої роботи.

Активується третій блок вікна ідентифікації навчальних параметрів. У цьому вікні задається кількість ітерацій (епох) навчання НМ, вибирається функція навчання зі списку (всього доступно 13 запрограмованих функцій), параметри вибірки бази даних. Починається процес навчання моделі об'єкта згідно обраного відомого алгоритму навчання *trainlm*.

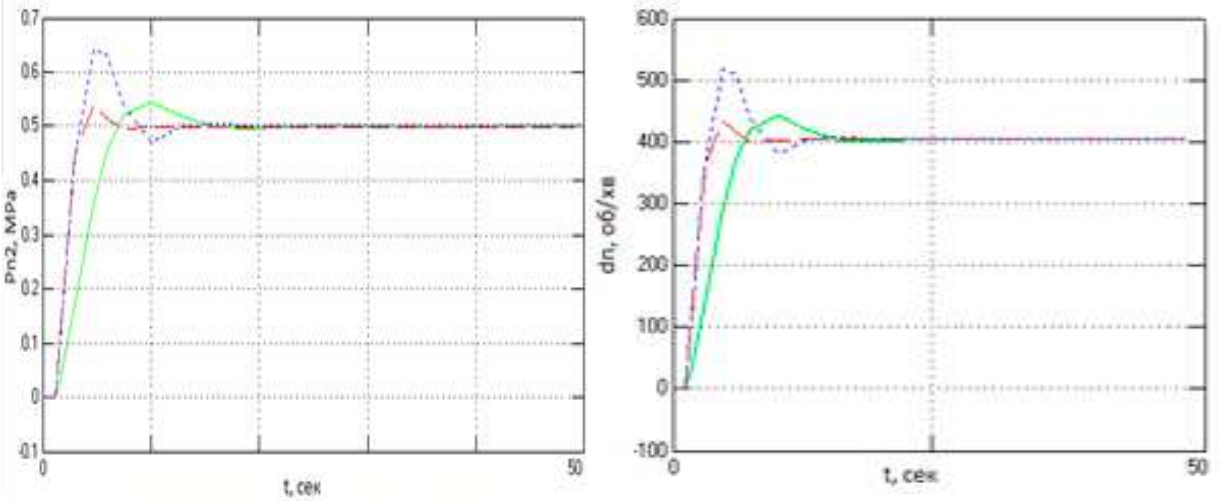
На завершення процедури необхідно прийняти всі виконані дії, налаштовані параметри та завантажити і перенестинавчену нейромережеву модель до блоку нейромережевого контролера лінеаризації відгуку в середовищі розробки Simulink та запустити процес імітаційного моделювання.

Аналіз роботи класичного ПІД-контролера, гібридного Fuzzy-PID-контролера та нейроконтролера з лінеаризацією відгуку в складі САК ГПА з прилеглою ділянкою трубопроводу проводиться шляхом імітаційного моделювання в середовищі Simulink під дією збурюючих чинників: ступеневої зміни уставки регулятора; ступеневих змін параметрів та внесення шумів у цих же каналах.

Для оцінки якості роботи АСР фіксувались у спільному осцилографічному вікні тренди приростів тиску на виході відцентрового нагнітача P_{n2} та приріст частоти обертання нагнітача d_n. Результати досліджень відображені на рис. 6-8.

Далі дослідження проводились при наявності білого шуму з використанням випадкових послідовностей за часом з каналом P_{n2} та G_n, при цьому одержали результати відображені на рис. 9, 10.

Результати симуляції для P_{n1}= 0, G_n=0 та P_{n2}=0.5МПа



а) б)

--- PID - регулятор;
-Fuzzy-PID - регулятор;
. . .NARMA-L2 - регулятор

Рисунок 6 – Результати роботи регуляторів при задаючому збуренні для каналу P_{n2} та d_n

Результати симуляції для P_{n1}= -1МПа, G_n=0 та P_{n2}=0.

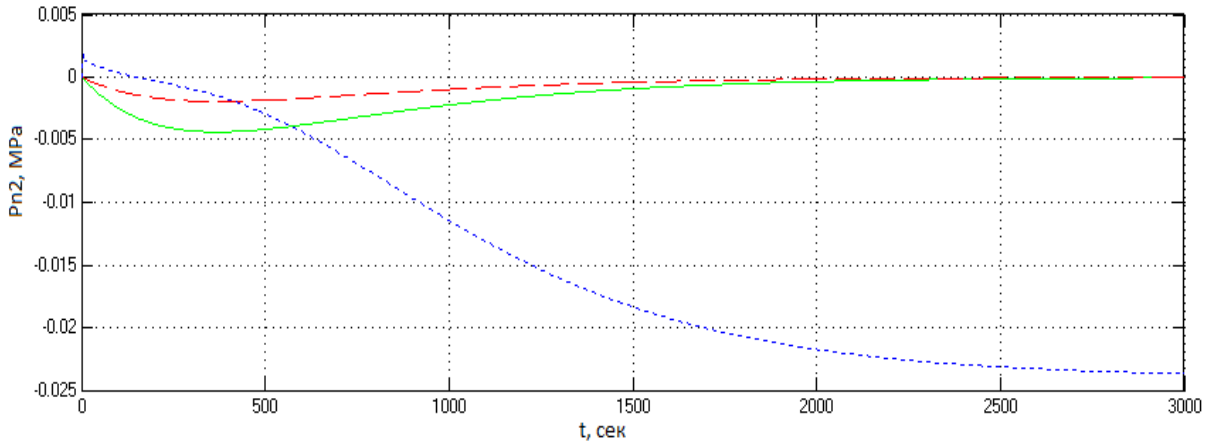


Рисунок 7 – Результати роботи регуляторів при зовнішньому збуренні по каналу P_{n1}

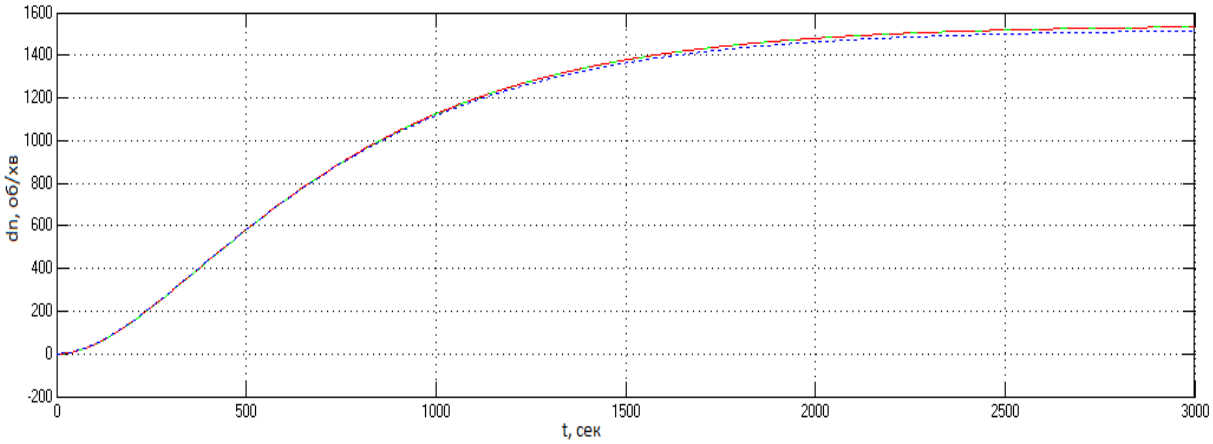


Рисунок 8 – Результати роботи регуляторів при різних збуреннях для каналу d_n

Таблиця 1 – Результати оцінки якості роботи синтезованих АСР

Тип контролера	Збурюючі фактори			Параметри якості роботи АСР				Усталене значення
	$P_{n1,МПа}$	$G_{n,,кг/с}$	$P_{n2,МПа}$	t_p,с	σ,%	$\delta_{max},МПа$	Δ,%	$d_{n,\ об/хв}$
PID	0	0	0,5	20	10	0,05	-	400
Fuzzy-PID				10	7	0,045	-	
NARMA-L2				20	25	0,15	-	
PID	-1	0	0	1900	-	0,045	-	1500
Fuzzy-PID				2300	-	0,02	-	
NARMA-L2				2600	-	0,023	2,3	
PID	0	25	0					
Fuzzy-PID								
NARMA-L2								

Результати симуляції для P_{n1}= 0, G_n=0 та P_{n2}=0.5МПа:

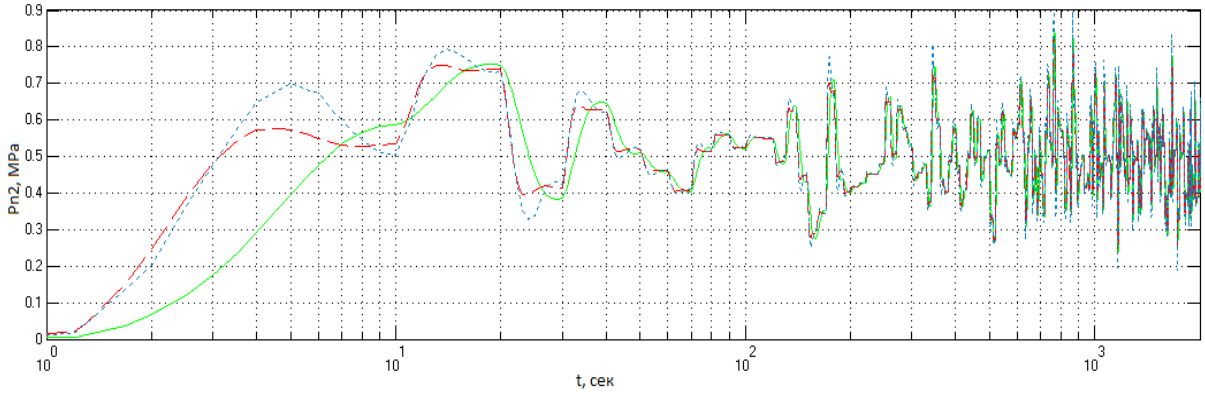


Рисунок 9 – Результати роботи регуляторів за наявності білого шуму в каналі P_{n2}

Результати симуляції для P_{n1}= -1, G_n=0 та P_{n2}=0:

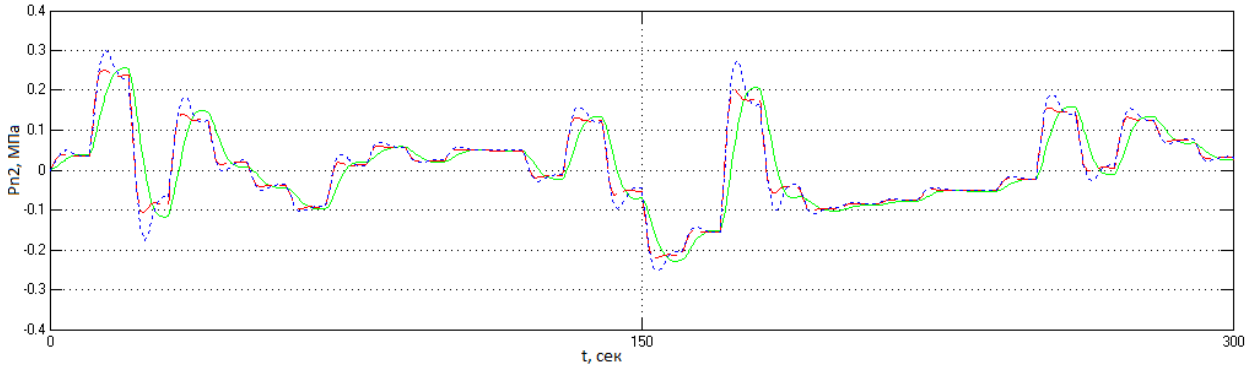


Рисунок 10 – Результати роботи регуляторів за випадку появи білого шуму для каналу P_{n2} та зовнішньому збуренні по каналу P_{n1}

Результати аналізу перехідних процесів в АСР з різними типами контролерів свідчить про можливість їхньої роботи на даному об'єкті. Всі синтезовані АСР достатньо ефективно відпрацьовують задаючу дію, так час регулювання знаходиться в межах 10-20с при перерегулюванні в 7-25%. Кращу роботу тут продемонстрував Fuzzy-PID-контролер, який має найкращі показники якості регулювання (t_p=*10с* та σ=*7%*). При дії зовнішніх збурюючи чинників, які відтворюють відповідно коливання тиску на виході попередньої компресорної станції та зміни у відборі газу споживачами, регулятори забезпечують стабілізацію тиску на виході нагнітача; максимальне відхилення регульованої величини складає від 0,02 до 0,045 МПа від номінального значення, що складає не більше 0,6%. NARMA-L2 - контролер має незначну статичну похибку (в межах 0,3%). Щодо часу регулювання, то тут краще показав себе PID-контролер (t_p=1900с), але у нього виявлено відхилення регульованої величини більше ніж у 2 рази за АСР з Fuzzy-PID-контролером. Слід зауважити, що при наявності зовнішніх збурень в каналі P_{n1}, стабілізація тиску P_{n2} досягається за рахунок значного зростання обертів нагнітача d_n=1500 об/хв, а це порушує верхню межу даного параметра і є недопустимим. У цьому

випадку необхідно змінити стратегію керування і перейти до стабілізації за обмежувальним параметром, що можна реалізувати в адаптивній системі керування. Синтезовані системи задовільно працюють за наявності шумів у каналі задання та зовнішнього збурення.

Висновки

В результаті проведених досліджень здійснений синтез контролерів з використанням систем не чіткого виводу та нейромереж для САК ГПА з прилеглою ділянкою трубопроводу.

Дослідження проведені із залученням методів математичного та імітаційного моделювання з використанням апарату нечіткого логічного виводу та нейромереж. Результати симуляції роботи АСР при збуреннях в каналах завдання та варіаціях зовнішніх впливів підтверджені відповідними трендами, обчислені якісні показники роботи систем керування за динамікою перехідних процесів.

Аналіз роботи синтезованих АСР показав, що всі вони можуть ефективно працювати в умовах різноманітних збурень та шумів, які діють на керований об'єкт, проте слід віддати перевагу PID та Fuzzy-PID-контролерам, оскільки вони забезпечують кращі показники якості роботи АСР та простіші в налагодженні.

В процесі дослідженьвстановлено, що запропоновані АСР не забезпечують ефективної роботи компресорного агрегата загалом при дії значних зовнішніх збурень, оскільки спостерігається вихід інших режимних параметрів ГПА на верхнє або нижнє обмеження. Таким чином, подальші дослідження слід проводити в напрямку синтезу адаптивних АСК зі зміною структури системи або алгоритмів її функціонування.

Література

1 Система автоматического регулирования режимов работы компрессорной станции магистрального газопровода, выполненная на базе программно-технических средств Series 4 (общее описание). Des Moines: Compressor Controls Corporation, 1995. – 44 с.

2 НПП "Укргазгеоавтоматика", АСУ КС [Електронний ресурс] / Режим доступу: http://www.geonorma.com.ua/ru/home/automation r/asu-ksm.

3 НКФ "Вега ЛТД", САУ ГПА Електронний ресурс] / Режим доступу: http://www.vega.kharkov.ua/index.php?page=kvant.

4 Колодяжний В.В. Досвід розроблення та впровадження автоматизованих систем керування компресорними станціями на прикладі автоматизації КС "Тарутине" / В.В.Колодяжний, О.В.Петірімов, В.Г.Старовойтов, В.Б.Коток // Нафтова і газова промисловість. – 2002. –№ 5. – С. 52 – 55.

5 Горбійчук М.І. Математична модель трубопроводу як елемента системи автоматичного керування процесом компримування природного газу / М.І. Горбійчук, М.І. Когутяк, О.Б. Василенко // Нафтогазова енергетика. – 2009. – № 2 (11). – С. 40–47.

6 Горбійчук М.І. Математична модель газоперекачувального агрегату як елемента системи автоматичного керування процесом компримування природного газу / М.І. Горбійчук, М.І. Когутяк, О.Б. Василенко // Науковий вісник ІФНТУНГ. – 2009. – № 4 (22). – С. 128–134.

7 Горбійчук М.І. Математична модель газоперекачувального агрегату з приліглою ділянкою трубопроводу / М.І. Горбійчук, М.І. Когутяк, О.Б. Василенко // Проблеми нафтогазової промисловості: зб. наук. праць. – К.: ДП Науканафтогаз, 2010. – Вип. VIII. – С. 201–208.

8 Горбійчук М.І. Аналітичні моделі газодинамічних приведених характеристик відцентрових нагнітачів природного газу / М.І. Горбійчук, М.І. Когутяк, Є.О. Ковалів // Науковий вісник ІФНТУНГ. – 2003. – № 1 (5). – С. 64–67.

9 Горбійчук М.І. Імітаційне моделювання роботи ГПА з прилеглим трубопроводом / М.І. Горбійчук, М.І. Когутяк,О.Б Василенко, Є.О. Ковалів,Л.І. Швець // Нафтогазова енергетика. – 2011. – № 2(15).

10 Дьяконов В. Математические пакеты расширения MATLAB. Специальный справочник / Дьяконов В., Кру глов В. – СПб.: Питер, 2001. – 480 с.

11 Hagan M. T. Neural Networks for Control/ Hagan M. T., Demuth H. B. // Proceedings of the 1999 American Control Conference. SanDiego: CA, 1999. P. 1642-1656.

12 Медведев В.С. Нейронные сети. MATLAB 6 / Медведев В.С., Потемкин В.Г. – М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2002. – 496 с.

13 Narendra K. S., Mukhopadhyay S. Adaptive Control Using Neural Networks and Approximate Models / Narendra K. S., Mukhopadhyay S. // IEEE Transactions on Neural Networks. 1997. Vol. 8. P. 475-485.

Стаття надійшла до редакційної колегії 08.02.13
Рекомендована до друку професором ***Горбійчуком М.І.*** *(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ) професором* ***Ковалівим Є.О.*** *(УМГ «Прикарпаттрансгаз», м. Івано-Франківськ)*

УДК 622.692.4

РОЗРАХУНОК РЕЖИМУ ОБСЛУГОВУВАННЯ І РАЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ РОЗБИТТЯ БЛОЧНО-КОМПЛЕКТНОГО УСТАТКУВАННЯ ЗА РІЗНИХ СТРАТЕГІЙ РЕМОНТНИХ РОБІТ

О.В. Іванов, Д.Ф. Тимків

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 49358,
e-mail: informatik@nung.edu.ua

Розглядаються стратегії технічного обслуговування і ремонту, а також наводиться розрахункова схема пошкодження блочно-комплектного устаткування магістральних газопроводів. Описуються можливі розрахункові схеми вибору індивідуальних раціональних стратегій обслуговування, а саме: блоки, вузли, деталі. Проводиться поділ показників ремонтопридатності для окремо розглянутих елементів. Досліджується вплив середнього наробітку в справному стані і середньому наробітку в передвідмовному стані на показники ефективності обслуговування блочно-комплектного устаткування, а саме, на коефіцієнт готовності і питомі затрати на обслуговування. Проводиться вибір раціональної стратегії і режиму обслуговування блочно-комплектного устаткування магістральних газопроводів, раціональної схеми виділення елементів зі складових частин блочно-комплектного устаткування.

Об'єктом дослідження є система магістральних газопроводів.

Метою дослідження є пошук можливих рішень для оптимізації обслуговування технологічного обладнання магістральних газопроводів.

Ключові слова: стратегії обслуговування, ремонт, ГПА, надійність, оптимізація.

Рассматриваются стратегии технического обслуживания и ремонта, а так же приводится расчетная схема повреждения блочно-комплектного оборудования магистральных газопроводов. Описаны возможные расчетные схемы выбора индивидуальных рациональных стратегий обслуживания: блоки, узлы, детали. Производится разделение показателей ремонт

оригодности для отдельно рассмотренных элементов. Исследуется влияние средней наработки в исправном состоянии и средней наработки в предотказном состоянии на показатели эффективности обслуживания блочно-комплектного оборудокания, а именно на коэффициент готовности и удельные затраты на обслуживание. Производится выбор рациональной стратегии и режима обслуживания блочно-комплектного оборудования магистральных газопроводов, рациональной схемы выделения элементов из составных частей блочно-комплектного оборудования.

Объектом исследования является система магистральных газопроводов.

Цель исследования – поиск возможных решений для оптимизации обслуживания технологического оборудования магистральных газопроводов.

Ключевые слова: стратегии обслуживания, ремонт, ГПА, надежность, оптимизация.

This research dedicated to the strategy of maintenance and repairs provides a design scheme of the damage of the main pipelines block-equipment. The paper describe possible settlement schemes of selecting individual strategies for maintenance, such as blocks, components, parts. Maintainability indicators are outlined for each of the elements. The influence of the average operating time under good conditions and average operating time in prefailure conditions on the performance of block maintenance equipment, namely a factor of readiness and unit costs for services. Rational strategies and service mode block-equipment of the main pipelines are discussed, and rational allocation scheme of elements with parts of block equipment is described.

The main subjects of this research is the system of main gas pipelines. The objective of the research is to find possible solutions to optimizing maintenance of technical equipment of the pipeline.

Keywords: maintenance strategy, repair, gas pumping unit, reliability, optimization.

Вступ

Результатом оптимізації процесу технічного обслуговування агрегатів і спорудження газотранспортних систем передбачається скорочення витрат на транспортування газу та зниження його собівартості. У зв'язку з цим питанню розробки раціональних стратегій технічного обслуговування елементів систем віддаленого транспортування газу приділяється велика увага.

Збільшення наробітку між відмовами дає змогу збільшити періодичність технічного обслуговування, виключити низку регламентованих операцій, тобто знизити трудомісткість, тривалість і вартість обслуговування.

Оптимізація стратегії технічного обслуговування та ремонту дає змогу вирішити ряд індивідуальних задач керування як при технічному обслуговуванні, так і під час ремонту.

Формування цілей статті

Оптимізації стратегії технічного обслуговування та ремонту – це вибір найкращої стратегії з трьох можливих. Вона повинна бути реальною та забезпечувати досягнення мети – необхідного екстремуму заданого критерію.

Для оптимізації ремонтних робіт потрібно вирішити двовимірну задачу вибору стратегії і оптимального режиму обслуговування та схеми розбиття блочно-комплектного устаткування на елементи обслуговування.

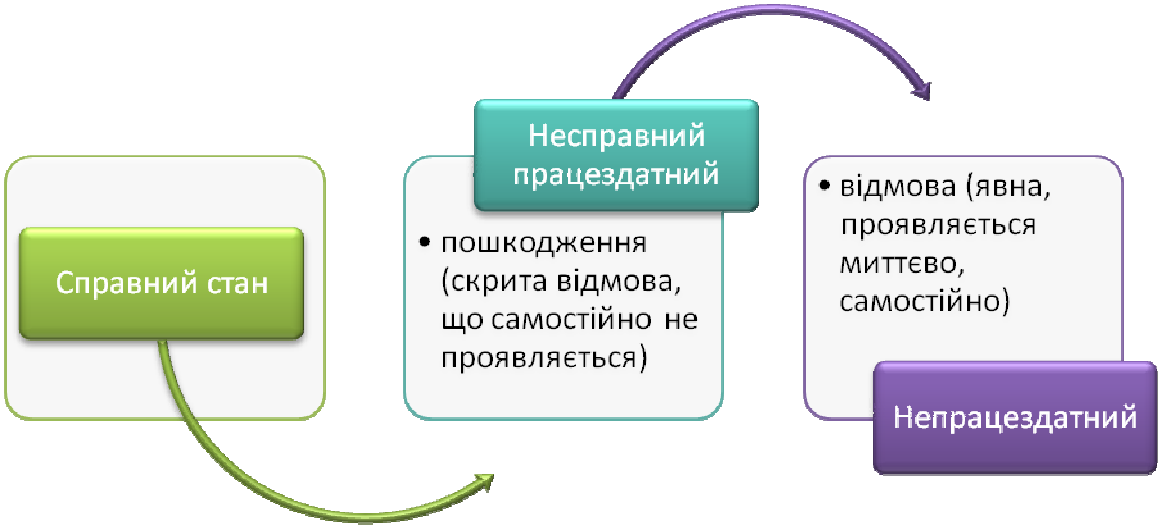


Рисунок 1 – Розрахункова схема пошкодження в БКУ

Оцінка ефективності стратегій технічного обслуговування блочно-комплектного устаткування магістрального газопроводу

Стратегіями обслуговування блочно-комплектного устаткування магістральних газопроводів розмежовуються три стани існування системи: функціонування в справному стані, функціонування в несправному (передвідмовному) стані, відмова (непрацездатний стан) (рис. 1). Тобто схема розвитку пошкодження блочно-комплектного устаткування (БКУ) чи однієї з його складових має вигляд, зображений на рис. 1.

Виходячи з положень, обґрунтованих у роботах [1, 2], об'єктами технічного обслуговування і ремонту може бути як БКУ загалом, так і його складові частини на різних рівнях структурної ієрархії конструкції БКУ.

Розглянемо три стратегії обслуговування і ремонту блочно-комплектного устаткування магістральних газопроводів:

Стратегія А. У початковий момент експлуатації блочно-комплектного устаткування планується:

- терміни й обсяги технічного обслуговування (види ТО);
- терміни заміни елементів за наробітком.

Середній і капітальний ремонт не планується і не проводиться. У випадку виникнення аварій елементи, що відмовили заміняються новими, а терміни чергових замін переплановуються. Терміни й обсяги технічних обслуговувань (види ТО) не переплановуються.

Ця стратегія найбільш близька до застосовуваного на об'єктах магістральних газопроводів у даний час, але істотно від них відрізняється:

1) поряд із профілактичним обслуговуванням передбачені заміни (хоча це і не стратегія замін), тобто використовуються конструктивні особливості БКУ;

2) проведення замін елементів дає змогу відмовитися від середніх і капітальних ремонтів;

3) проведення замін в умовах застосування уніфікованих блоків, вузлів і агрегатів дає змогу модернізувати устаткування;

4) стратегія регламентована, але не жорстко, тому що після усунення наслідків аварій переплановуються терміни чергових замін для елементів, що відмовили.

Складність і підвищена трудомісткість експлуатації об'єктів магістральних газопроводів у екстремальних кліматичних умовах (наприклад, в гірських районах), розвиток вахтового і безвахтового методів обслуговування, перехід до "безлюдної технології" вимагають пошуку принципово нових стратегій обслуговування устаткування. Особливого значення набуває при цьому проведення перевірок устаткування з метою попередження відмов і аварій.

Друга стратегія, розроблена для блочно-комплектного устаткування – стратегія обслуговування з перевірками.

Стратегія В. У початковий момент експлуатації блочно-комплектного устаткування плануються:

- терміни проведення і обсяги технічних обслуговувань (види ТО);
- терміни заміни елементів за наробітком;
- терміни проведення додаткових перевірок, за результатами яких також проводяться заміни елементів.

У випадку аварії замінюються елементи, що відмовили. Для будь-яких замінених елементів терміни чергових замін переплановуються. Терміни додаткових перевірок не переплановуються .

Стратегія В може трактуватися як стратегія А з додатковими перевірками і додатковими замінами. При стратегії В зростають витрати на технічне обслуговування, але досягається підвищення надійності в порівнянні зі стратегією А. Підвищення надійності означає зниження аварійності, а, отже, і зниження експлуатаційних витрат.

Найбільш перспективною групою стратегій є стратегії обслуговування устаткування за станом. Застосування устаткування блокової конструкції сприяє переходу до стратегій технічного обслуговування і ремонту за станом [3]. Обслуговування і ремонт за станом вимагає широкого розвитку діагностування як ГПА, так і іншого устаткування магістральних газопроводів /49/. У сучасних умовах і на даному рівні розвитку методів і засобів діагностики доцільно застосовувати найпростіші види стратегій за станом. Подібна стратегія формується в такий спосіб.

Стратегія С. У початковий момент часу планується:

- терміни й обсяги технічних обслуговувань (види ТО),
- додаткові періодичні перевірки.

Під час перевірок оцінюється технічний стан БКУ і його елементів за основними параметрами і системі коефіцієнтів стану (експертні оцінки), що коректують значення наробітку до планової заміни. За результатами оцінки приймається рішення про заміну елементів.

При аварії заміняються елементи, що відмовили. Терміни й обсяги технічних обслуговувань і періодичність перевірок не переплановуються.

Стратегія С найбільш близька до прогресивної групи стратегій "за станом". В даний час у галузі існує необхідність переходу на технічне обслуговування і ремонт устаткування за станом. Однак фактичний перехід підприємств і організацій, що експлуатують і ремонтують устаткування магістральних газопроводів, затруднений через відсутність досить ефективних засобів і методів діагностування [4]. Пропонована стратегія С дозволяє вже сьогодні враховувати фактичний стан устаткування при призначенні робіт з обслуговування і ремонту. Експертні оцінки використовуються оскільки:

- по-перше, немає потрібної статистики;
- по-друге, немає необхідних засобів і методів діагностики.

Для вибору раціональної стратегії мінімізуються середні питомі витрати на обслуговування при фіксованому коефіцієнті готовності. Кожна стратегія прораховується для різних рівнів: БКУ (наприклад, ГПА), блок, вузол. Блоки і вузли ГПА (чи ГРС) розглядаються як відособлені об'єкти. Загалом блочно-комплектний ГПА розглядається як відособлена система послідовно з'єднаних (за надійністю) елементів (блоків) з незалежними відмовами. Відмова одного елемента (блоку або вузла) призводить до відмови системи ГПА загалом.

Раніше проведені дослідження [1] дають можливість розподіляти блочно-комплектне устаткування і його складові частини по групах стратегій:

а) до передвідмовного стану - для об'єктів, відмова яких залежить від наробітку і може вплинути на безперебійність функціонування; об’єкти, що володіють достатнім рівнем контролепридатності; для об’єктів діагностування технічного стану яких наявні достовірні, економічно доцільні методи і засоби;

б) до безпечної відмови (тобто, з контролем рівня надійності) - для об'єктів, що відповідають таким вимогам: відмова об'єктів не впливає на безперебійність транспортування газу, основними видами відмов є випадкові, що не залежать від наробітку; наявні методи і засоби виявлення відмов цих об'єктів у процесі чи експлуатації при технічному обслуговуванні. Експлуатаційна технологічність цих об'єктів забезпечує відновлення працездатності системи після їхнього відмови протягом часу, передбаченого на технічне обслуговування;

в) до вироблення ресурсу - для об'єктів, у яких: відмова впливає на безперебійність функціонування і може призвести до зриву плану або небезпечної ситуації; інтенсивність відмов зростає з наробітком; коли відсутні достовірні, економічно доцільні методи і засоби їхнього діагностування, рівень експлуатаційної технологічності такий, що не дозволяє робити заміну і відновлення працездатності системи після появи відмови протягом часу, що відводиться на технічне обслуговування БКУ.

Дослідження, проведені в даній роботі вказують на доцільність і високу економічну ефективність розподілу устаткування, блоків і вузлів за розробленими для блочно-комплектного устаткування магістральних газопроводів принципово новими стратегіями (стратегії А, В і С).

Пропоновані стратегії (А, В і С) можуть бути застосовані і до устаткування магістральних газопроводів у традиційному виконанні. Для цього досить планувати не заміни, а проведення ремонтно-відновлювальних робіт. У такий спосіб для неблокового (традиційного) устаткування одержуємо три стратегії.

Найбільш загальною є стратегія В тому будемо розглядати її формування і дамо оцінку ефективності для відокремленого блочно-комплектного об’єкта магістрального газопроводу.

За визначаючі приймаємо параметри:

1) Розподіл часу роботи БКУ в справному стані. Для його описання використовується одна з декількох, що рівні за ступенем зручності функцій:

функція розподілу часу роботи агрегату в справному стані:

$$F(t) = P\{\xi \le t\}, \qquad (1)$$

де ξ – випадкова тривалість роботи БКУ в справному стані;

густина імовірності:

$$f(t) = \frac{dF}{dt}. \qquad (2)$$

Розподіл часу роботи в передвідмовному стані:

функція розподілу часу роботи БКУ в несправному, тобто в перед відмовному стані

$$\Phi(t) = P\{\eta \le t\}. \qquad (3)$$

Принциповою умовою є припущення про незалежність тривалості станів, тобто

$$P\{\xi \le x; \eta \le y\} = F(x)\Phi(y). \qquad (4)$$

Для створення математичної моделі введено такі позначення:

для показників ремонтопридатності:

T_p – назначений ресурс (планове напрацювання);

τ – час на обслуговування (або проведення операцій);

C – вартість обслуговування (або проведення операцій);

для показників ефективності обслуговування:

$З_p$ – абсолютні середні затрати на обслуговування за період регенерації;

t_p – абсолютний середній час на обслуговування;

t'_p – напрацювання до зняття (заміни).

Для опису стратегії перевірок приймемо:

• всього проводиться n перевірок, в момент T_p перевірка не проводиться;

• перевірки проводяться з періодичністю θ;

• змінами стану об'єкта під час роботи перевірки нехтуємо;

• проведення перевірок не впливає на надійність об'єкта обслуговування;

• кожна перевірка забезпечує абсолютну достовірність визначення пошкодження (передвідмовного стану).

Таким чином, кількість перевірок становить:

$$n = \left[\frac{T_p}{\theta}\right] - 1, \qquad (5)$$

де θ – періодичність перевірок.

Для всіх показників у математичних моделях прийнято загальні індекси подій:

пр – перевірка;

пред – попереджувальна заміна за результатами перевірки;

плпред – попереджувальна заміна в момент T_p за умови передвідмовного стану;

пл – заміна в момент T_p за умови справного стану;

ав – аварійна заміна.

Виходячи зі схеми розвитку пошкодження для відокремленого блочно-комплектного об'єкта магістрального газопроводу, отримано значення середніх сумарних затрат на обслуговування за період регенерації:

$$\overline{З}_p(\theta, T_p) = \sum_{\kappa=0}^{n-1} \int_{\kappa}^{(\kappa+1)\theta} dF(t)\left\{\kappa C_{пр} + \overline{\Phi}[(\kappa+1)\theta - t]\times\right.$$

$$\left.\times\left[C_{пр} + C_{пред}\right] + \int_{0}^{(k+1)\theta - t} d\Phi(y)\left[C_{ав}\right]\right\} + \qquad (6)$$

$$+ \int_{n\theta}^{T_p} dF(t)\left\{nC_{пр} + \overline{\Phi}(T_p - t)C_{пл.пред} + \Phi(T_p - t)C_{ав}\right\} +$$

$$+ \overline{F}(T_p)\left[C_{пл} + nC_{пр}\right],$$

де $\overline{\Phi} = (1 - \Phi)$ – функція ненадійності;

Ф – функція надійності по $\overline{F}(t)$ і $F(t)$;

де $C_{ав}$ – час аварійного ремонту (заміни);

$C_{пр}$ – час на перевірку;

$C_{пред}$ – час на ремонт (заміну) за результатами перевірки;

$C_{план}$ – час на ремонт (заміну) в справному стані;

$C_{плпред}$ – час на попереджувальний ремонт (заміну)в передвідмовому стані.

Для моделювання розрахунків стратегій і режиму обслуговування блочно-комплектного устаткування магістральних газопроводів використано розподіл Вейбулла.

Таким чином, для розподілу часу роботи в справному стані маємо:

$$F(t) = 1 - \exp(-a_1 t^{b_1}), \qquad (7)$$

$$\overline{F}(t) = \exp(-a_2 t^{b_2}); \qquad (8)$$

а для розподілу часу роботи в передвідмовному (несправному, але роботоздатному) стані маємо:

$$\Phi(t) = 1 - \exp(-a_\Phi t^{b_\Phi}), \qquad (9)$$

$$\overline{\Phi}(t) = \exp(-a_\Phi t^{b_\Phi}); \qquad (10)$$

де a_F і a_Φ – параметр масштабу,

b_F і b_Φ – параметр форми.

Для середнього напрацювання до заміни або зняття з експлуатації отримуємо:

$$t'_p(\theta, T_p) = \sum_{\kappa=0}^{n-1} \int_{\kappa\theta}^{(\kappa+1)\theta} dF(t)\left\{t + \overline{\Phi}[(\kappa+1)\theta - t]\times\right.$$

$$\left.\times\left[(\kappa+1)\theta - t\right] + \int_{0}^{(k+1)\theta - t} d\Phi(y)y\right\} + \qquad (11)$$

$$+ \int_{n\theta}^{T_p - t} dF(t)\left\{t + \overline{\Phi}(T_p - t)(T_p - t) + \int_{n\theta}^{T_p - t} d\Phi(y)y\right\} +$$

$$+ + \overline{F}(T_p)T_p .$$

Середній час на обслуговування визначаємо з наступного отриманого виразу:

$$t_p(\theta, T_p) = \sum_{\kappa=0}^{n-1} \int_{\kappa\theta}^{(\kappa+1)\theta} dF(t)\left\{\kappa\tau_{пр} + \overline{\Phi}[(\kappa+1)\theta - t]\times\right.$$

$$\left.\times\left[\tau_{пр} + \tau_{пред}\right] + \int_{0}^{(k+1)\theta - t} d\Phi(y)\tau_{ab}\right\} + \qquad (12)$$

$$+ \int_{n\theta}^{T_p - t} dF(t)\left\{n\tau_{пр} + \overline{\Phi}(T_p - t)\tau_{пл.пред} + \Phi(T_p - t)\tau_{ab}\right\} +$$

$$+ \overline{F}(T_p)\left[\tau_{пл} + n\tau_{пр}\right],$$

де $\tau_{ав}$ – час аварійного ремонту (заміни);

$\tau_{пр}$ – час на перевірку;

$\tau_{пред}$ – час на ремонт (заміну) за результатами перевірки;

$\tau_{план}$ – час на ремонт (заміну) в справному стані;

$\tau_{плпред}$ – час на попереджувальний ремонт (заміну) в передвідмовому стані.

Питомими показниками ефективності обслуговування і ремонту є:

$\overline{З}_p = \frac{З_p}{t'_p}$ – питомі затрати на одиницю напрацювання;

$\overline{З}'_p = \frac{З_p}{t'_p + t_p}$ – питомі затрати на одиницю календарного часу;

$K_Г = \frac{t'_p}{t'_p + t_p}$ – середня частка часу в працездатному стані (коефіцієнт готовності).

За наявності повної інформації про тривалість роботи об'єкта в справному і передвідмовному стані, коли відомі функції розподілу F(t) і Ф(t), знаходимо оптимальне число перевірок і їх періодичність, котрі забезпечують мінімальні затрати за умови забезпечення високого коефіцієнта готовності.

Задачу вибору оптимального режиму обслуговування БКУ магістральних газопроводів необхідно розв'язувати як оптимізаційну задачу, що дозволяє мінімізувати питомі затрати на обслуговування БКУ при обмеженнях, накладених на коефіцієнт готовності обладнання. Таким чином, за наявності повної інформації про параметри функцій розподілу F(t) і Ф(t) задача вибору оптимального режиму обслуговування БКУ запишеться в вигляді [6/64, 65, 66]:

$$\left.\begin{array}{l} \min\limits_{\theta, T_p} \overline{З}_p\left(\theta, T_p\right) \\ при \qquad K_Г\left(\theta, T_p\right) \geq K^0_{Г\,\min} \end{array}\right\}, \qquad (13)$$

де $K^0_{Г\,\min}$ – задане мінімальне значення коефіцієнта готовності.

Раціональні стратегії обслуговування для структурних схем відокремленого блочно-комплектного устаткування магістральних газопроводів

Як відокремлене блочно-комплектне устаткування розглянемо блочний газоперекачуючий агрегат, який є основним видом технологічного устаткування як традиційних, так і блочно-комплектних компресорних станцій.

Всі роботи за технічного обслуговування і ремонту повинні виконуватися в повній відповідності з діючими інструкціями з технічного обслуговування і ремонту конкретного устаткування. А зокрема, для ГПА за діючою в теперішній час методикою розрахунки термінів виведення в плановий ремонт проводяться за щорічними статистичними даними про відмови ГПА. При цьому враховується надійність тільки механічної частини ГПА. Відбудовні роботи на допоміжних системах пристосовуються до ремонту деталей і вузлів агрегату /3/. Після того, як для кожної деталі ГПА визначено оптимальні терміни дефектації, розробляється об'єднання ремонтних робіт для деталей, що мають близькі значення періодів регенерації. У такий спосіб використовується не весь ресурс елементів ГПА, тобто утвориться так званий залишковий ресурс.

Блочно-комплектний ГПА складається, як правило, із блоків, вузлів і деталей. У деяких ГПА авіаційний привод має модульну конструкцію. Резервування на жодному з перерахованих структурних рівнів блочно-комплектних ГПА немає.

При обслуговуванні за стратегіями А, В і С замінними елементами для об'єкта загалом є блоки, вузли і деталі; для блоків - блоки, вузли і деталі; для вузлів - вузли і деталі. У такий спосіб об'єктами обслуговування є ГПА, блоки і вузли. Очевидно, що заміняти тільки блоки або тільки деталі недоцільно. Виходячи з цього, маємо різні розрахункові схеми (рис. 2). Однак слід зазначити, що в перспективі під час створення необхідного обмінного фонду обслуговування і ремонт БКУ магістральних газопроводів шляхом заміни тільки блоків може виявитися досить ефективним і економічно доцільним. Насамперед це може мати місце для блочно-комплектних об'єктів, експлуатованих у важкодоступних регіонах зі складним природно-кліматичними умовами.

При виборі індивідуальних раціональних стратегій обслуговування структурних рівнів відособленого блочно-комплектного устаткування магістрального газопроводу необхідно, насамперед, виходити з технологічних міркувань (уніфікації, ремонтної технологічності, доцільного розчленовування і тощо). Потім з конкуруючих варіантів вибрати за результатами проведених розрахунків найбільш раціональний, тобто конкретну стратегію, що забезпечує за даних значень безвідмовності і ремонтопридатності екстремуми показників ефективності режиму обслуговування.

При кожній конкретній схемі розбивання БКУ на об'єкти обслуговування і для кожного окремо розглянутого блоку чи вузла деталі існуватиме досить строге співвідношення показників ремонтопридатності (рис. 3).

Відповідно до побудованої моделі технічного обслуговування і ремонту БКУ магістральних газопроводів досліджений вплив середнього наробітку в справному стані і середньому наробітку в передвідмовному стані на показники ефективності обслуговування БКУ. Результати розрахунків представлені на рисунках 4 і 5.

Для стратегій з ремонтом вартість і час планових і планово-попереджувальних ремонтів можуть бути близькі за абсолютним значенням мінімальним аварійним:

$$\begin{array}{l} \max\ \tau_{пл} \leq \max\ \tau_{пл.перд} \leq \min\ \tau_{ab} \\ \max\ c_{пл} \leq \max c_{пл.перд} \leq \min\ c_{ab} \end{array}. \qquad (14)$$

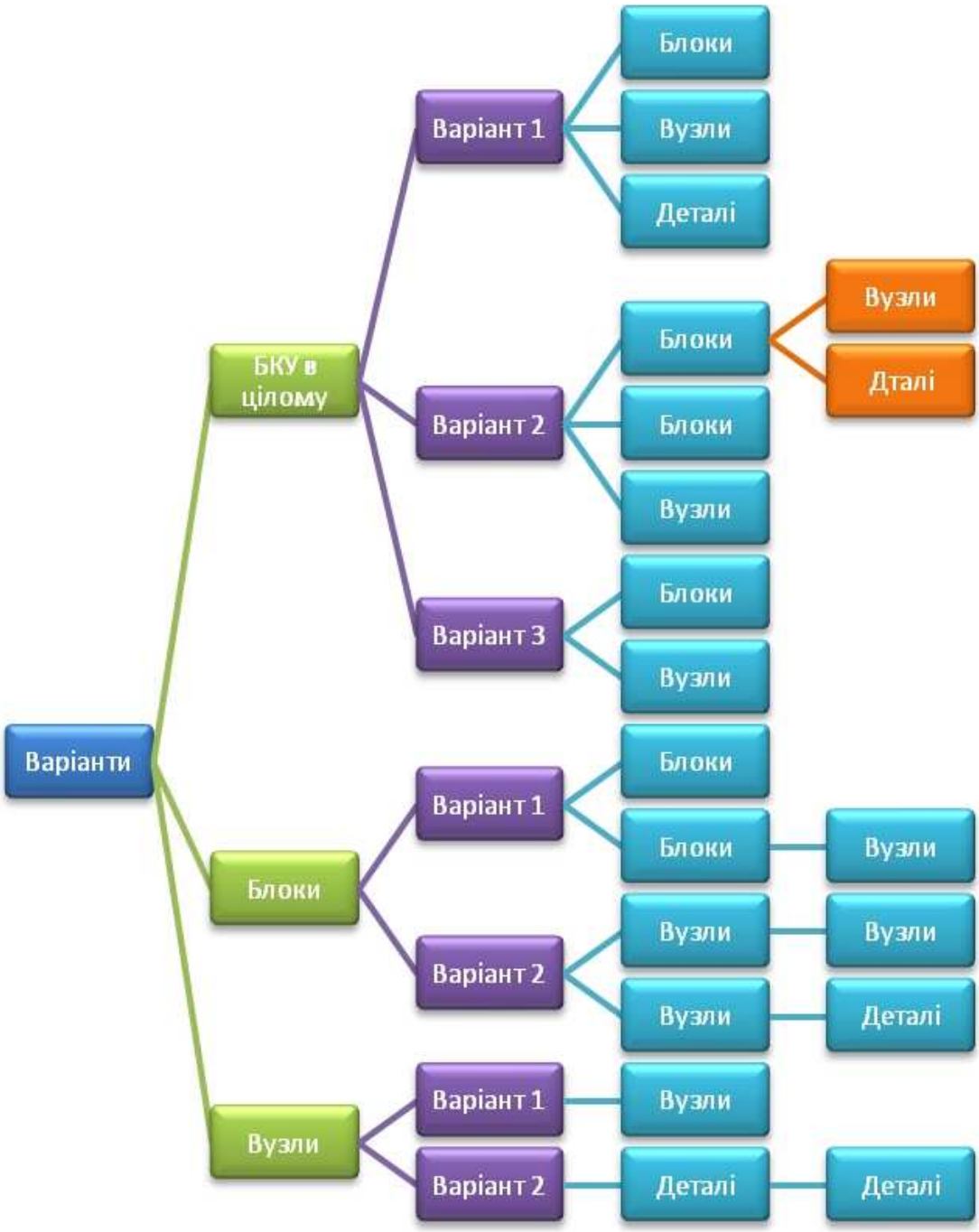


Рисунок 2 – Можливі розрахункові схеми вибору індивідуальних раціональних стратегій обслуговування

Для перевірок по стратегіях з ремонтом маємо:

$$\begin{matrix} \tau_{пр} < \tau_{пл}, \\ c_{пр} < c_{пл} \end{matrix}. \qquad (15)$$

У випадку стратегії із замінами (тобто обслуговується блочно-комплектне устаткування) все по-іншому. Час заміни (планової, планово-попереджувальної, і навіть попереджувальної) може виявитися меншим часу, необхідного на перевірку цього ж елемента. Невисокою є вартість власне операції "заміна", і в окремих випадках вона може бути меншою витрат на перевірку. Однак необхідно мати на увазі, що ні абсолютний час на заміну, ні вартість операції із заміни елемента не характеризують процес технічного обслуговування і ремонту. При технічному обслуговуванні і ремонті за стратегіями А, В і С у пропонованих математичних моделях, визначаючи значення показників ремонтопридатності, варто враховувати витрати і час, пов'язані з демонтажно-монтажними роботами, очікуванням і доставкою запасного елемента, та (за необхідності) спеціалізованої ремонтної бригади [5]. Необхідно включати у витрати вартість елемента, отриманого з обмінного фонду (з чи обліком без обліку зданого в ремонт).



Рисунок 3 – Поділ показників ремонтопридатності для окремо розглянутих елементів

При фіксованій стратегії обслуговування (стратегія В) і фіксованому місці ремонту (ремонт на базі) визначаємо оптимальні рівні обслуговування БКУ, тобто вибираємо раціональну схему розбиття БКУ на об'єкти обслуговування. У таблиці 1 наведено фрагмент результатів розрахунків для трьох альтернативних схем розчленовування блочно-комплектного ГПА на об'єкти обслуговування. Аналіз розрахунків свідчить, що з трьох розглянутих альтернативних схем розбиття (на блоки, на вузли, на деталі) схема розчленовування на вузли загалом для досліджуваних об'єктів є раціональної. Однак у ряді випадків за певних умов (наприклад, у табл. 1 для ГПА № 1 при T_P = 20000 год, θ = 870 год) раціональної може бути і схема розбиття на блоки. Виконані розрахунки і дослідження показали, що найбільш раціональними для блочно-комплектних ГПА є схеми типу II, IV і V (рис. 3).

Для структурних рівнів відособленого блочно-комплектного устаткування магістральних газопроводів вибираємо індивідуальні раціональні стратегії обслуговування, вирішуючи задачу виду (13) для кожного конкретного об'єкта.

Аналіз і розрахунки, проведені по блочно-комплектних ГПА ГТК-25, ГПА-Ц6,3 ГТН-16 довели:

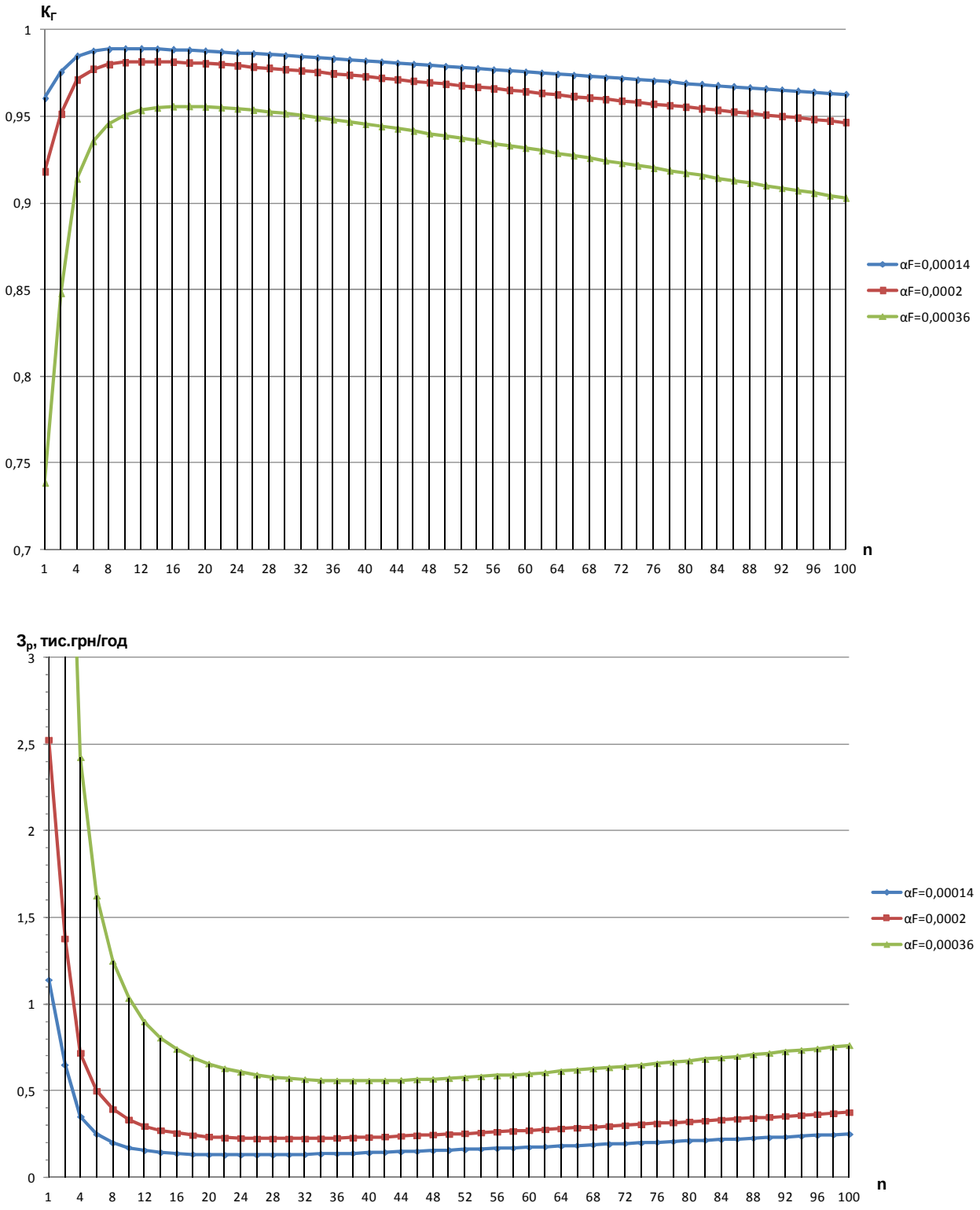


Рисунок 4 – Зміна показників обслуговування БКУ за різних значень середнього напрацювання в справному стані (параметр α_F)

Якщо час, потрібний на усунення наслідків аварії (аварійну заміну) не перевищує часу на проведення планових робіт, то максимальний коефіцієнт готовності для високонадійних об'єктів обслуговування (наприклад, блоків) досягається при стратегії А. При переході до стратегії В коефіцієнт готовності, природно, знижується, тобто перші перевірки нічого, крім витрат часу і коштів, не дають. Однак при наступних перевірках коефіцієнт готовності починає зростати, досягає максимального значення при визначеній (оптимальній) періодичності перевірок, і знову спадає, тобто подальше збільшення кількості перевірок недоцільне. При цьому середні питомі витрати змінюються немонотонно. При невеликій кількості перевірок

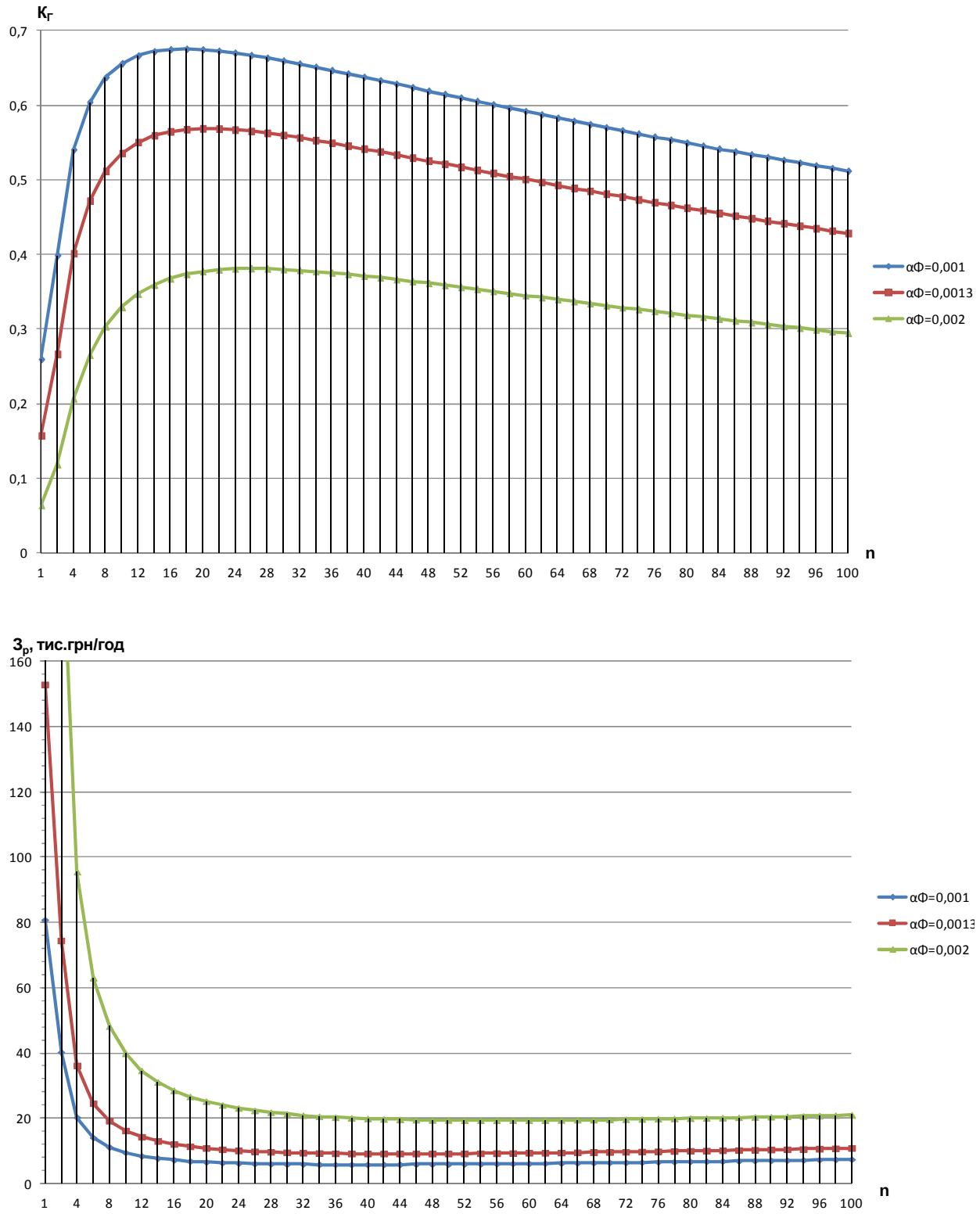


Рисунок 5 – Зміна показників обслуговування БКУ за різних значень середнього напрацювання в передвідмовному стані (параметр $\alpha_Ф$)

(велика періодичність) вони зростають, потім зменшуються, досягають оптимального значення і знову ростуть.

В даний час як машинобудівні заводи, що випускають блокові ГПА, так і спеціалізовані підприємства з виготовлення блочно-комплектних пристроїв враховують, що ресурс вузлів і деталей, що мають обмежений термін служби, повинний бути погоджений із установленим міжремонтним періодом, тобто бути рівним чи кратної йому.

У такий спосіб для кожного елемента з трьох стратегій (А, В и С) вибираємо найбільш раціональну. Якщо під час перевірки на працюючому устаткуванні не можна переконатися в повній справності блоків чи вузлів, то

Таблиця 1 – Вибір раціональної схеми розчленування БКУ на об'єкти обслуговування (на прикладі блочного ГПА «ГТК-10І »при $K^0_{A\,min} = 0{,}98$)

Стаціонарний № ГПА	Режим обслуговування		Питомі витрати за різних схем розчленування $\min \overline{З_p}$, грн./год		
	θ , год.	Тр, год.	На блоки	На вузли	На деталі
1	800	8000	80,58	63,24	83,64
	800	12000	66,81	59,67	83,13
	842	16000	60,18	55,59	82,11
	870	20000	56,1	59,67	83,64
2	800	8000	82,11	63,75	86,19
	800	12000	67,32	61,2	84,66
	842	16000	62,22	56,61	83,64
	870	20000	57,63	60,69	86,7
3	800	8000	90,27	66,81	90,78
	800	12000	88,23	63,24	87,72
	842	16000	82,11	59,67	87,21
	870	20000	75,99	61,2	87,21
4	800	8000	89,76	65,79	91,29
	800	12000	86,19	62,22	87,21
	842	16000	80,58	59,16	86,19
	870	20000	74,97	60,69	86,7

Таблиця 2 – Вибір раціональної стратегії і режиму обслуговування БКУ магістральних газопроводів (на прикладі блоків приводів БКУ)

Тип ГПА	Стратегія	$K^0_{\Gamma\min}$	$\min \overline{З_p}$, грн/год	Режим обслуговування і ремонту	
				θ , год.	Тр, год.
ГТК-25І	A	0,945	94,35	-	4000
	B	0,955	61,71	516	16000
	C	0,955	57,63	738	-
ГТН-16	A	0,63	41,31	-	6000
	B	0,65	33,15	387	12000
	C	0,65	26,52	452	-
ГПА-Ц6,3	A	0,74	62,57	-	8000
	B	0,68	39,2	842	16000
	C	0,68	31,5	968	-

необхідно вивести БКУ на профілактику і зняти вузол для контролю на спеціальних стендах і приладах. Діагностика проводиться відповідно до методів, розроблених в [6] і нормативних документів.

Розрахунки показали, що найкращими для елементів БКУ магістральних газопроводів є стратегії В и С, при яких можливе забезпечення високого коефіцієнта готовності за істотного зниження питомих витрат у порівнянні зі стратегією А (табл. 2).

Висновки

На основі виконаних досліджень доказана доцільність розчленування БКУ на елементи різного рівня ієрархії, вибору раціональної схеми розчленування БКУ на об'єкти обслуговування, визначення стратегії і режиму обслуговування для кожної схеми.

Проведені дослідження показали, що періодичність обслуговування і ремонту блочно-комплектних ГПА і їхніх елементів істотно залежить не тільки від індивідуальних надійнісних характеристик (зокрема, показників безвідмовності), але і від призначеного ресурсу (тобто терміну до планового чи ремонту заміни). Одержуємо вершине оптимуму. При цьому домагаємося питомих витрат на технічне обслуговування, істотно менших, ніж для стратегії А, тобто під час обслуговування без перевірок.

В результаті отримали, що більш кращими для елементів БКУ магістральних газопроводів

є стратегії В и С, за яких можливе забезпечення високого коефіцієнта готовності при істотному зниженні питомих витрат у порівнянні зі стратегією А (табл. 2).

Література

1 Грудз В.Я. Обслуговування і ремонт газопроводів: монографія / В.Я.Грудз, Д.Ф.Тимків, В.Б.Михалків, В.В.Костів. – Івано-Франківськ: Лілея-НВ, 2009. – 711 с.: іл. – 703-708. - 4 курс, 5 курс.

2 Іванов О.В. Аналіз обслуговування технологічного обладнання магістральних газопроводів / О.В. Іванов // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2012. –№2(43). – С. 56-65.

3 Куриц С.Я. Блочно-комплектное строительство в нефтяной и газовой промышленности / С.Я. Куриц. – М.: Недра, 1977. – 304 с.

4 Технічна діагностика трубопровідних систем: монографія / [Грудз В.Я., Грудз Я.В., Костів В.В. та ін.]. – Івано-Франківськ: Лілея–НВ, 2012. – 512 с.

5 Комягин А.Ф. Централизация технического обслуживания газопроводов / А.Ф. Комягин, О.А. Атаев. – М.: Недра, 1978. - 288 с.

6 Терентьев Л.И. Ремонт газоперекачивающих агрегатов с газотурбинным приводом / Терентьев Л.И., Седых З.С. – М.: Недра, 1985. – 232 с.

Стаття надійшла до редакційної колегії 26.02.13
Рекомендована до друку професором ***Грудзом В.Я.*** *(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)*
професором ***Петришиним Л.Б.*** *(Прикарпатський національний університет імені В. Стефника, м. Івано-Франківськ)*

УДК 622.691.4

КІНЕТИКА ДЕФОРМАЦІЇ І РУЙНУВАННЯ ОСНОВНОГО МЕТАЛУ ТА ЗВАРНОГО З'ЄДНАННЯ ТРУБОПРОВОДУ У МОРСЬКІЙ ВОДІ

[1]Л.Я. Побережний, [1]Т.Ю. Пиріг, [2]І.Б. Окіпний, [1]В.Б. Асатрян

[1]ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 727173, e-mail: poberezhny@nung.edu.ua

[2]ТНТУ ім. І. Пулюя, 46001, м. Тернопіль, вул. Руська,56, тел. (0352) 254964, e-mail: kaf_zv@tntu.edu.ua

Проведено моделювання процесу укладання трубопроводу S та J-методами з метою виявлення впливу передексплуатаційного навантаження в циклі укладання на деформаційну поведінку основного металу та зварного з'єднання трубопроводу з пошкодженим ізоляційним покриттям в процесі експлуатації, його корозійно-втомну довговічність та ресурс безпечної експлуатації. За результатами корозійно-втомних випробовувань за схемою навантаження чистим згином з частотою навантаження 0,8 Гц побудовано криві низькочастотної корозійної втоми зразків з основного металу та зварного з'єднання морського трубопроводу з переднавантаженням та без нього. Встановлено деякі закономірності впливу рівня механічних напружень та передексплуатаційних навантажень на ресурс та відносний ресурс безпечної експлуатації основного металу та зварного з'єднання трубопроводу у морській воді. Шляхом аналізу макробудови поверхонь зламів показано збільшення негомогенності та появу дефектності в структурі основного металу та зварного з'єднання трубопроводу внаслідок передексплуатаційних навантажень.

Ключові слова: передексплуатаційне навантаження, корозійна втома, довговічність, кінетика амплітуди циклічної деформації, ресурс безпечної експлуатації, відносний ресурс безпечної експлуатації, морські трубопроводи.

Проведено моделирование процесса укладки трубопровода S и J-методами с целью выявления влияния предэксплуатационный нагрузки в цикле укладки на деформационную поведение основного металла и сварного соединения трубопровода с поврежденным изоляционным покрытием в процессе эксплуатации, его коррозионно-усталостную долговечность и ресурс безопасной эксплуатации. По результатам коррозионно-усталостных испытаний по схеме нагрузки чистым изгибом с частотой нагрузки 0,8 Гц построены кривые низкочастотной коррозионной усталости образцов из основного металла и сварного соединения морского трубопровода с преднагрузкой и без нее. Установлены некоторые закономерности влияния уровня механических напряжений и предэксплуатационных нагрузок на ресурс и относительный ресурс безопасной эксплуатации основного металла и сварного соединения трубопровода в морской воде. Путем анализа макростроения поверхностей изломов показано увеличение негомогенности и появление дефектности в структуре основного металла и сварного соединения трубопровода вследствие предэксплуатационных нагрузок.

Ключевые слова: предэксплуатационная нагрузка, коррозионная усталость, долговечность, кинетика амплитуды циклической деформации, ресурс безопасной эксплуатации, относительный ресурс безопасной эксплуатации, морские трубопроводы.

The process of pipeline laying by S and J-methods for identifying the impact of preoperational load of laying cycle on the deformational behavior of the base metal and welded joint of pipeline with damaged insulation coating in service, its corrosion-fatigue life and resource of safe operation is performed. Low-frequency corrosion fatigue curves for specimens of the base metal and welded joint of offshore pipeline with and without preload are constructed according to the results of corrosion-fatigue tests under pure bending load circuit with frequency of 0.8 Hz load. Some regularities of impact of mechanical stress level and preoperational loads on resource and relative resource of safe operation of the base metal and welded joint of pipeline in sea water are estimated. By analyzing of macrostructure fracture surfaces the increasing of inhomogeneity and appearing of defects in the structure of the base metal and welded joint of pipeline due to preoperational loads is shown.

Keywords: preoperational load, corrosion fatigue, durability, kinetics of the amplitude of the cyclic strain, resource of safe operation, relative resource of safe operation, offshore pipelines.

Вивчення умов експлуатації морських трубопроводів показало, що їхнє руйнування відбуваються внаслідок спільного негативного впливу корозійно-активного середовища та знакозмінних навантажень з відносно невеликою частотою навантаження [1]. Якщо переміщення трубопроводу відбувається із значною амплітудою коливання, тобто при високих амплітудах циклічних напружень, то швидкість і характер корозійно-втомного руйнування трубопроводу визначатиме механічний чинник, а вплив електрохімічних процесів внаслідок малої тривалості взаємодії з середовищем буде незначним. Тому в даному випадку довговічність визначатиметься в основному схильністю металу до деформаційного зміцнення або знеміцнення [2] з урахуванням впиву температури та адсорбційних ефектів [3]. При невеликих знакозмінних напруженнях швидкість руйнування трубопроводу визначатиметься корозійним чинником.

Метою роботи було дослідження впливу навантажень у процесі укладання на корозійно-втомну довговічність та ресурс безпечної екс-

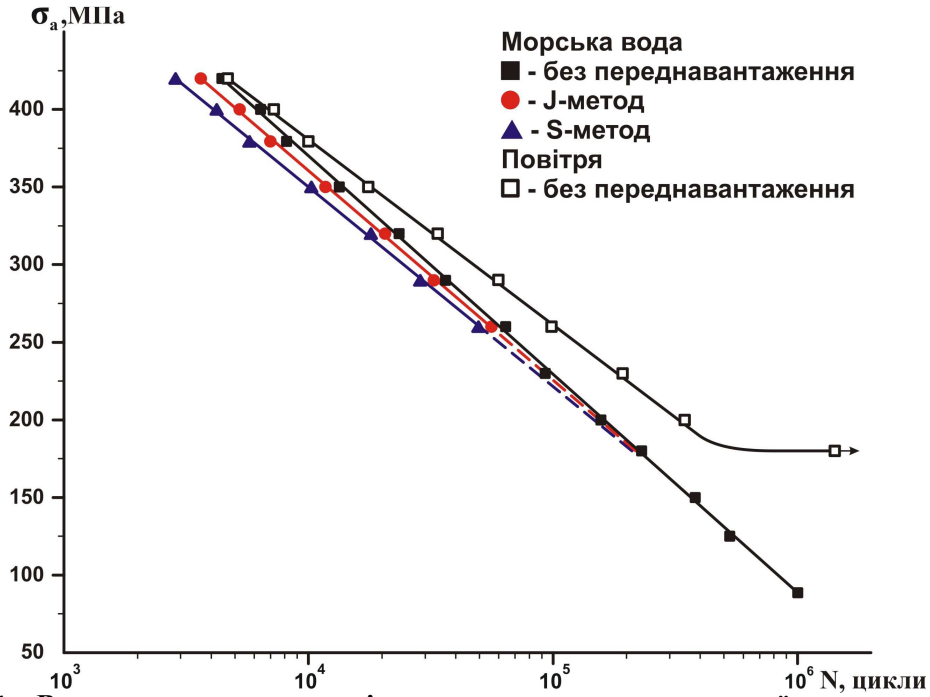


Рисунок 1 – Взаємне розташування ділянок кривих низькочастотної втоми та корозійної втоми сталі 09Г2С з переднавантаженням S- і J-методом та без нього

плуатації морських трубопроводів, оскільки на даний час у діючих нормативних документах вони достатньо не враховуються.

Для вивчення поведінки матеріалу трубопроводу в циклі укладання та в області низькочастотної корозійної втоми (0,8 Гц) використовували циліндричні зразки-моделі з діаметром робочої частини d=5 мм, виготовлені із заготовок, вирізаних зі стінки труби. Для основного металу використовували довгі зразки з довжиною робочої частини l_p=50 мм, а для зварного з'єднання – короткі зразки з довжиною робочої частини l_p=20 мм. Об'єктом досліджень вибрано безшовні гарячедеформовані труби з низьколегованої сталі 09Г2С діаметром 426 мм із товщиною стінки 16 мм, які широко використовуються при спорудженні морських трубопроводів [1]. Корозійно-втомні випробування в середовищі морської води проводили за схемою навантаження чистим згином за розробленою раніше методикою [4].

Втомним випробовуванням передувало моделювання процесу укладання трубопроводу S та J-методами з метою виявлення впливу попереднього квазістатичного навантаження в циклі укладання на деформаційну поведінку матеріалу трубопроводу в процесі експлуатації. Моделювання передексплуатаційного навантаження (переднавантаження) в процесі укладання трубопроводу S-методом відбувалося шляхом одноциклового знакозмінного навантаження зразків, яке на діаграмі згину призводить до утворення петлі механічного гістерезису [5], яка складається з двох півциклів. Моделюванню процесу укладання трубопроводу J-методом відповідав перший півцикл навантаження, якому піддавались зразки під час моделювання його процесу укладання S-методом. Імітацію процесу укладання трубопроводу S- та J-методами проводили на зразках-моделях шляхом ступінчастого навантаження. Зі збільшенням чи зменшенням навантаження на один ступінь номінальні напруження змінювалися на величину $\Delta\sigma$ = 20 МПа. Час витримки на кожній ступені t розраховується в залежності від рівня номінальних напружень та способу укладання з урахуванням того, що довжина укладання за цикл навантаження трубопроводу приймається рівною L=300 м [1], а швидкість укладання V=3 км/доб [6].

Переднавантаження проводили винятково у середовищі повітря. Пошкодженням ізоляційного покриття в циклі укладання нехтували. Після проведення моделювання переднавантаження зразок витримувався розвантаженим не менше 12 годин для максимальної релаксації напружень.

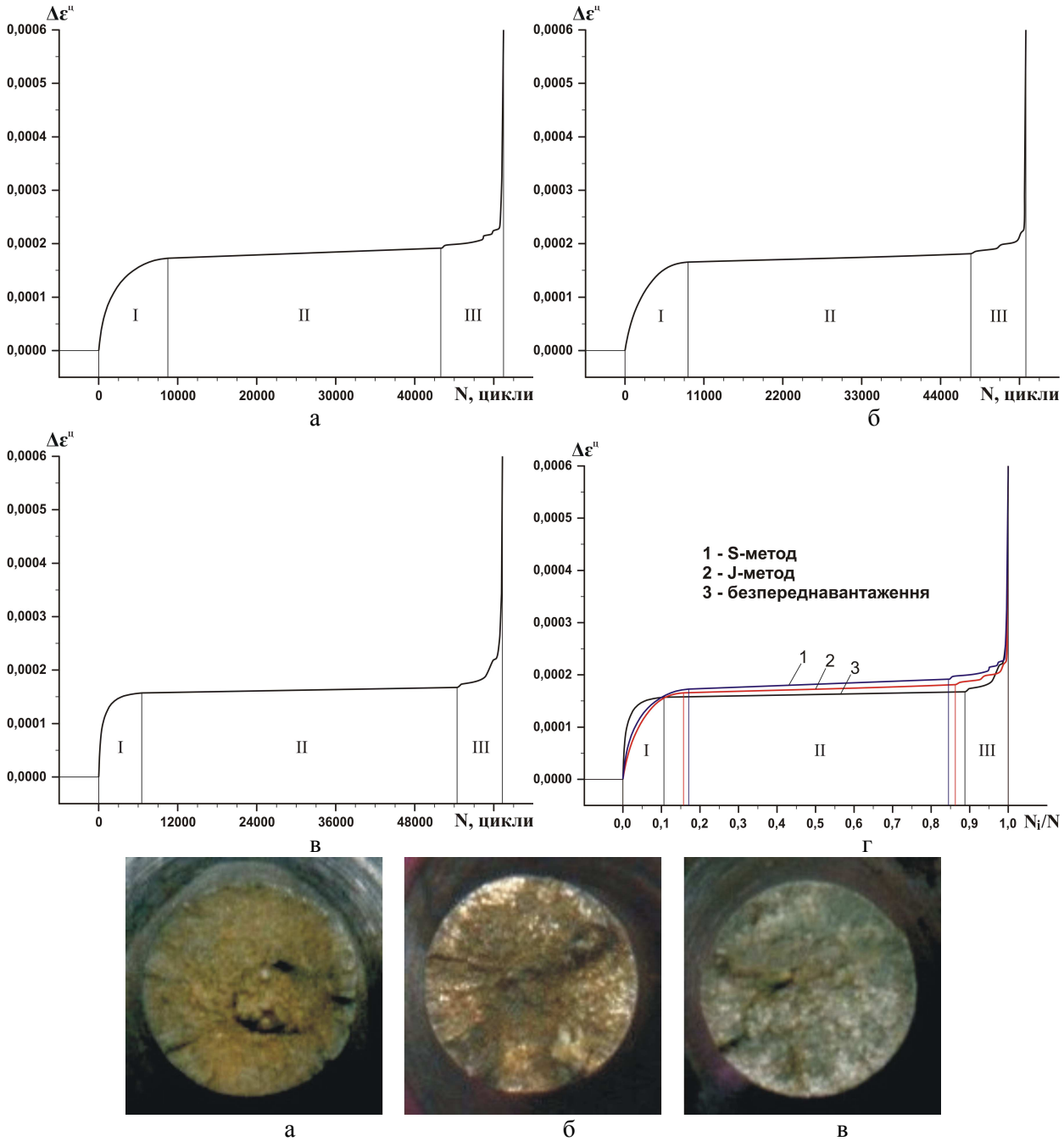
За результатами корозійно-втомних досліджень були побудовані криві втоми для основного металу трубопроводу в морській воді (для імітації роботи з пошкодженим ізоляційним покриттям) з урахуванням передексплуатаційних навантажень в процесі укладання трубопроводу S- та J-методом та без них (рис. 1). Аналіз одержаних кривих свідчить, що із збільшенням рівня номінальних напружень, в морській воді, як і на повітрі [7], посилюється негативний вплив переднавантаження на загальну довговічність сталі трубопроводу. Якщо при σ_a = 260 МПа в процесі укладання трубопроводу J- та S-методом довговічність зменшується в 1,07 та 1,16 разів (на 6,7 та 13,6 %), а при σ_a = 320 МПа – в 1,13 та 1,29 разів (на 11,3 та 22,5 % відповідно), то при σ_a = 420 МПа – в 1,23 та 1,55 разів (на 18,5 та 35,5 %) відповідно. При цьому умовна границя корозійної витривалості сталі трубопроводу на базі 10^6 циклів в морській воді складає $\sigma_{-1к}$=90 МПа.

Як видно з рис. 1, ділянки кривих корозійної втоми знаходяться лівіше кривої втоми на повітрі, а точка перетину цих ділянок лежить на границі між областями циклічної повзучості та втомного зламу, якій відповідає 420 МПа. При зниженні σ_a від 420 МПа довговічність сталі в корозійному середовищі, у порівнянні з повітрям, закономірно зменшується. Якщо за амплітуди напружень σ_a = 320 МПа довговічність сталі з переднавантаженням J і S-методом та без нього в морській воді у порівнянні з повітрям [7] зменшується в 1,33, 1,32 та 1,36 разів (на 25,1, 24,6 та 26,2 %), а при σ_a = 260 МПа – в 1,51, 1,49 та 1,58 разів (на 33,9, 32,9 та 36,6 %) відповідно, то при $\sigma_a = \sigma_{-1}$ – приблизно в 2 рази. Якщо ж порівняти довговічність сталі з переднавантаженням J і S-методом та без нього у морській воді з довговічністю сталі без переднавантаження на повітрі, то при σ_a = 320 МПа вона зменшиться в 1,53, 1,75 та 1,36 разів (на 34,6, 42,9 та 26,2 %), а при σ_a = 260 МПа – в 1,69, 1,82 та 1,58 разів (на 40,8, 45,2 та 36,6%) відповідно.

Одним з найбільш небезпечних наслідків впливу циклічних напружень та корозійно-активного середовища є не стільки інтенсифікація процесу корозії, скільки її перехід від загальної до місцевої. Циклічні напруження після певного числа циклів навантаження в найбільш перенапружених і слабких зернах поверхневого шару зразка (зазвичай в концентраторах напружень) викликають зсуви по площинах ковзання. Адсорбція поверхнево-активних елементів середовища (атоми, іони, комплекси), знижуючи поверхневу енергію металу та полегшуючи роботу приповерхневих джерел дислокацій і їх вихід на поверхню, прискорює зсувні процеси (первинний процес впливу середовища). Переміщення дислокацій вздовж смуг ковзання після кожного циклу навантаження призводить до утворення ділянок ювенільннх поверхонь, які стають анодами і разом з поверхнею зразка та бічними стінками тріщин утворюють гальванічні пари (вторинний процес впливу середовища). Анодний процес буде найбільш інтенсивним в місцях виникнення зсувів, біля вершин утворених мікро- і макротріщин втоми, оскільки в цих місцях відбувається найбільше зниження електродного потенціалу при циклічному навантаженні зразка. Також розчинення анодних ділянок посилюється тим, що їхня площа значно менша від площі катодних ділянок (дно тріщини – анод, стінки тріщини і зовнішня поверхня зразка – катод). Слід зазначити, що в зародженні мікрогальванічних пар корозійної втоми важливу роль відіграють не тільки місця виходу на поверхню дислокацій, але й зміна субструктури металу, що полягає в дробленні окремих зерен на субзерна з різною орієнтацією, які збільшують його електрохіміну гетерогенність.

Також на процес корозійної втоми можуть впливати багато інших чинників, які залежно від умов будуть проявлятися тією чи іншою мірою. На корозійну втому можуть впливати зменшення анодної поляризації, скупчення домішок або атомів легуючих елементів на дефектних ділянках, що з'явилися в результаті ковзання, та на границях кристалітів і субзерен [8]. Вони утворюють один з електродів гальванічної пари, що бере участь у зародженні тріщини. На корозійно-втомний процес може впливати менша, ніж на поверхні, концентрація кисню або пасивно-активних елементів у тріщинах, утворених шляхом зародження та поглиблення мікротріщин. Це сприяє інтенсивному раз'їданню дна тріщини, яке виступає в ролі анода. При цьому продукти корозії, утворені всередині тріщини, що мають, як правило, більший об'єм, ніж розчинений метал, можуть виконувати розклинювальну дію і, таким чином, збільшувати швидкість росту тріщини. Крім того, в тріщині можуть утворюватися продукти електрохімічної реакції, що відрізняються більш високою агресивністю, ніж саме корозивне середовище [9]. Таким чином, виникають сприятливі умови для наводнювання металу. Досить важливим чинником, що прискорює процес корозійної втоми, є руйнування окисних плівок, яке призводить до різкого зниження електродного потенціалу. Крім того, саме циклічне навантаження, при інших рівних умовах, активуючи метал, знижує роботу виходу, внаслідок чого іон металу легше може покинути кристалічну гратку і перейти в розчин, ніж за відсутності напружень.

Як бачимо, результати втомних випробовувань не показали значного впливу переднавантаження на загальну довговічність матеріалу трубопроводу як на повітрі, так і у середовищі морської води. Звідси виникає хибне уявлення про можливість нехтування історією передексплуатаційних навантажень в процесі укладання на ресурс роботи трубопроводу. Але насправді ситуація докорінно інша. Експлуатація трубопроводу в умовах поширення в його матеріалі втомних (корозійно-втомних) тріщин є неприпустимою і лише об'єднаний аналіз кривих втоми та кінетичних кривих деформації дає змогу правильно оцінити ресурс, ураховуючи, що тривалість останньої стадії може складати понад 30% загальної довговічності. Тому необхідно розробляти та впроваджувати новітні методичні підходи, які дають змогу забезпечити надійну роботу морських тробопроводів на основі науково обгрунтованих рішень, а не банально збільшуючи коефіцієнт запасу міцності. Така практика особливо потрібна в часі світової фінансової кризи і дасть змогу заощадити кошти на етапі спорудження шляхом оптимізації вибору матеріалу трубопроводу та зменшення металоємності конструкції. У Енергетичній стратегії України до 2030 року значну увагу приділено нарощуванню власного видобутку нафти і газу головні неосвоєні поклади якого знаходяться на шельфі Чорного та Азовського морів. Розвиток шельфового видобутку неодмінно супроводжуватиметься спорудженням морських підводних трубопроводів, тому наукові дослідження у даному напрямку безпосередньо підвищуватимуть енергетичну безпеку держави.

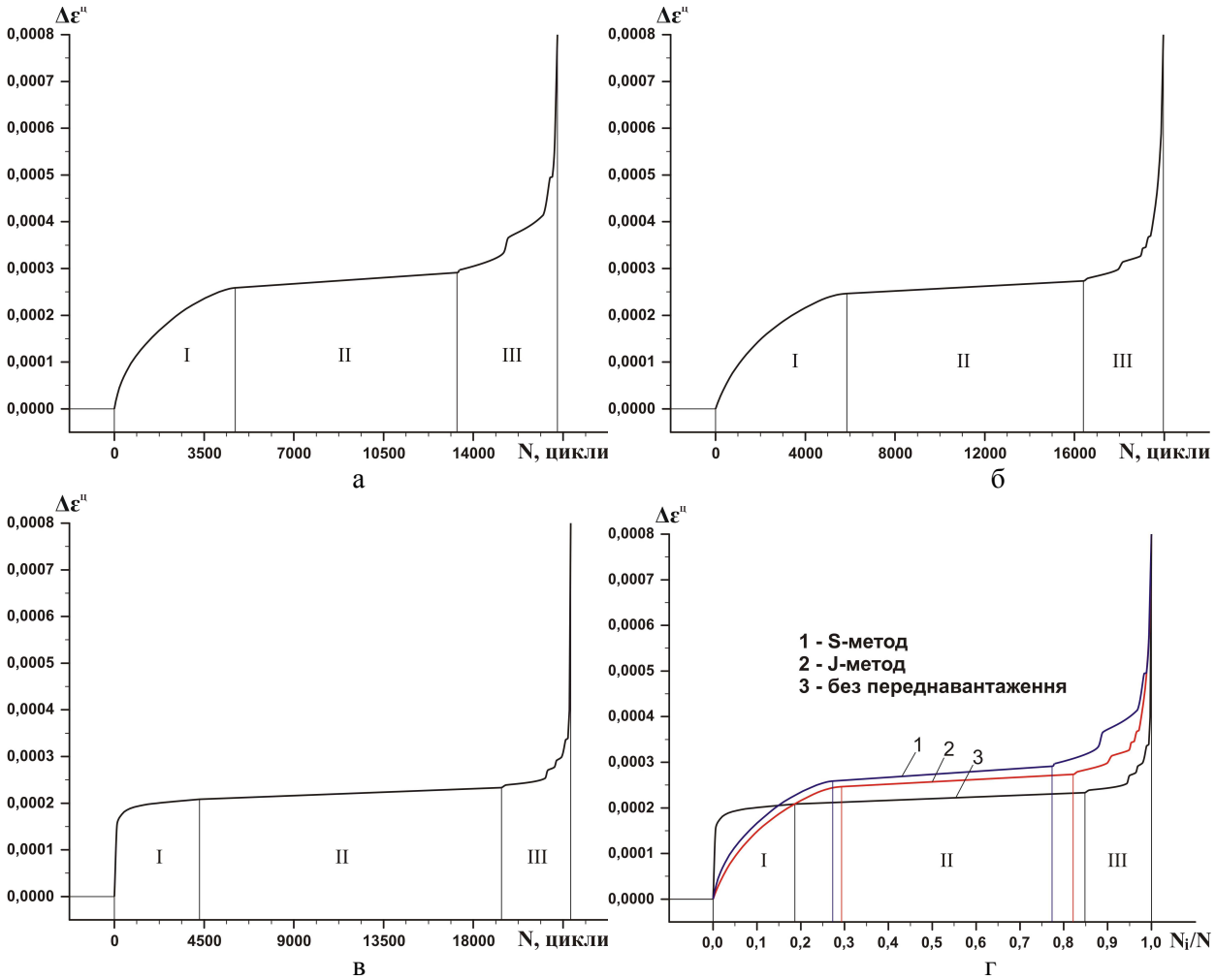


а б в

Рисунок 2 – Кінетика амплітуди циклічної деформації сталі 09Г2С та вигляд поверхонь руйнування за рівня напружень 260 МПа з переднавантаженням S- (а), J-методом (б) та без нього (в) і в об'єднаному вигляді (г) у морській воді

Криві втоми трубних сталей не розкривають стадійності цього складного процесу, тому нами здійснено комп'ютерну реєстрацію кінетики деформації при низькочастотному навантаженні. Користуючись побудованою за результатами механічних випробовувань зразків-моделей діаграмою згину, з метою кращого порівняльного аналізу нами було вибрано три рівні номінальних напружень відповідно до величини границі плинності матеріалу трубопроводу $\sigma_{0,2}$: $0{,}95\sigma_{0,2}$, $1{,}15\sigma_{0,2}$ та $1{,}5\ \sigma_{0,2}$, які відповідно становлять 260, 320 та 420 МПа.

За результатами корозійно-втомних досліджень досліджень нами були одержані кінетичні криві деформації зразків-моделей з переднавантаженням S та J-методом та без нього (рис. 2, 3, 4) у морській воді. З метою простішого визначення впливу передексплуатаційних навантажень на зменшення довговічності пропонується по осі абсцис замість абсолютних значень довговічності N використовувати відносні – N_i/N, де N_i – кількість пройдених циклів навантаження (рис. 2, 3, 4, г). Вони показують порівняно з повітрям зростання тривалості I-ої стадії низькочастотної корозійної втоми як для переднавантажених зразків, так і для зразків без попереднього навантаження при 260 і 320 МПа та, навпаки, – її зниження при 420 МПа. При цьому, для переднавантажених зразків зберігається тенденція до збільшення амплітуди ста-



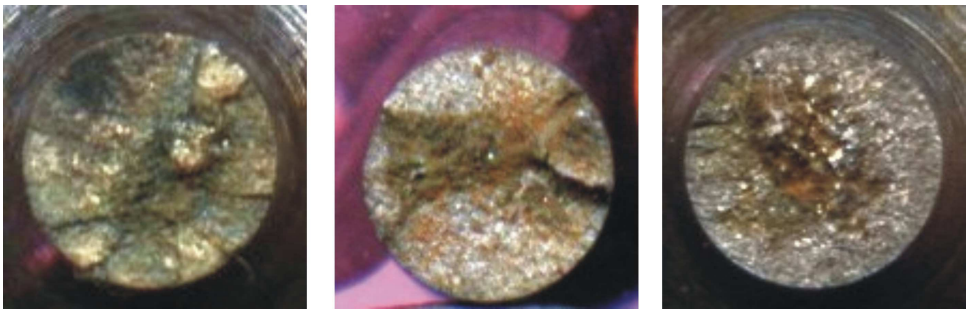
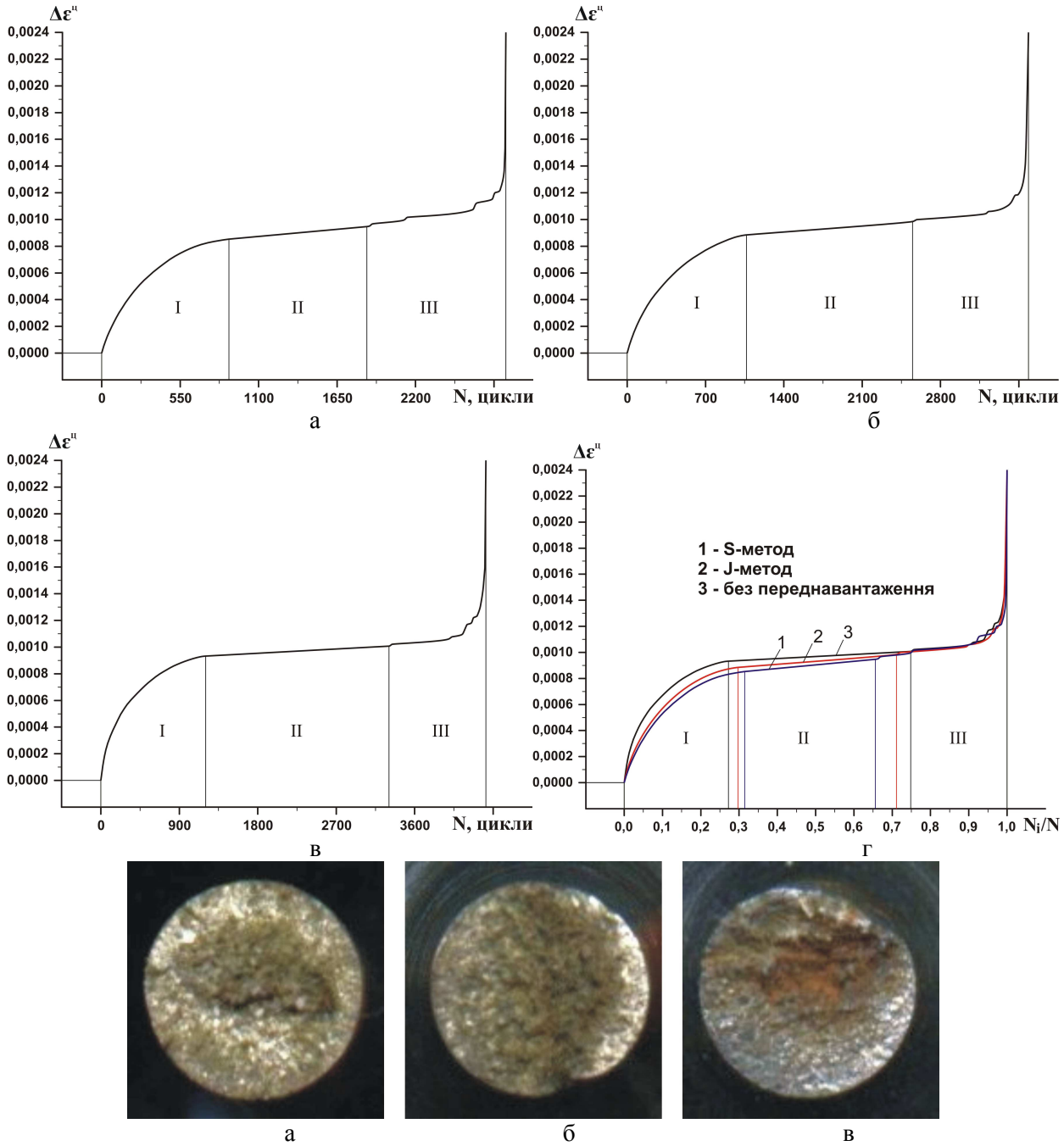


Рисунок 3 – Кінетика амплітуди циклічної деформації сталі 09Г2С та вигляд поверхонь руйнування за рівня напружень 320 МПа з переднавантаженням S- (а), J-методом (б) та без нього (в) і в об'єднаному вигляді (г) у морській воді

білізації пластичної деформації на початку II-ї стадії при 260 і 320 МПа та її незначного зменшення при 420 МПа.

Для випадку попереднього переднавантаження J-методом величина амплітуди стабілізації циклічної деформації порівняно зі звичайним навантаженням при випробовуваннях на рівні напружень 260 МПа та 320 МПа зростає відповідно на 8,1 % та 16,9 %, а при рівні напружень 420 МПа – знижується на 4,1%. Для випадку попереднього переднавантаження S-методом ця величина порівняно зі звичайним навантаженням при випробовуваннях на рівні напружень 260 МРа та 320 МРа зростає відповідно на 12,9% та 23,9 %, а при рівні напружень 420 МРа – знижується на 7,8 %.

Також слід зазначити, що морська вода інтенсифікує процес циклічного деформування та зумовлює збільшення амплітуди стабілізації циклічної деформації на початку II-ї стадії порівняно з повітрям, що можна пов'язати з адсорбційним впливом електроліту. Загалом механізм руйнування трубопроводу з пошкодженим ізоляційним покриттям в морській воді можна пояснити, виходячи з адсорбційно-електрохімічної теорії корозійної втоми [9]. Вона зводиться до того, що на початку прикладання циклічних напружень відбуваються мікродеформації металу, а також адсорбційні, дифузійні і корозійні



а б в

Рисунок 4 – Кінетика амплітуди циклічної деформації сталі 09Г2С та вигляд поверхонь руйнування за рівня напружень 420 МПа з переднавантаженням S- (а), J-методом (б) та без нього (в) і в об'єднаному вигляді (г) у морській воді

процеси, які посилює деформація. Циклічні напруження спричиняють зсуви з надривами, на основі яких виникають втомні тріщини, в яких локалізується анодний процес. Корозійно-активне середовище розчиняє анодні ділянки поверхні металу. Але швидше за корозію протікає адсорбція поверхнево-активних компонентів середовища – іонів або молекул з електроліту, яка проявляється в зменшенні втомної витривалості – явищі адсорбційної втоми [10]. Адсорбція, полегшуючи роботу приповерхневих джерел дислокацій, їх вихід на поверхню, інтенсифікує зсувні процеси і, відповідно, мікродеформацію (ефект Ребіндера). Так, зростання амплітуди стабілізації циклічної деформації для всіх зразків з урахуванням передексплуатаційних навантажень в процесі укладання трубопроводу J та S-методом та без них в морській воді порівняно з повітрям складає при σ_a = 260 МПа 19,4, 14,7 та 27,8 %, при σ_a = 320 МПа – 15,5, 13,2 та 17,1 %, а при σ_a = 420 МПа – 14,9, 23,2 та 1,7 % відповідно. Дане явище додатково пояснює зменшення загальної довговічності та ресурсу безпечної експлуатації трубопроводу, який відповідає III-ій стадії низькочастотної корозійної втоми, порівняно з повітрям.

Циклічне деформування на завершальній III стадії пов'язане з прискореним ростом корозійно-втомних тріщин, формуванням та поширенням магістральної тріщини аж до початку

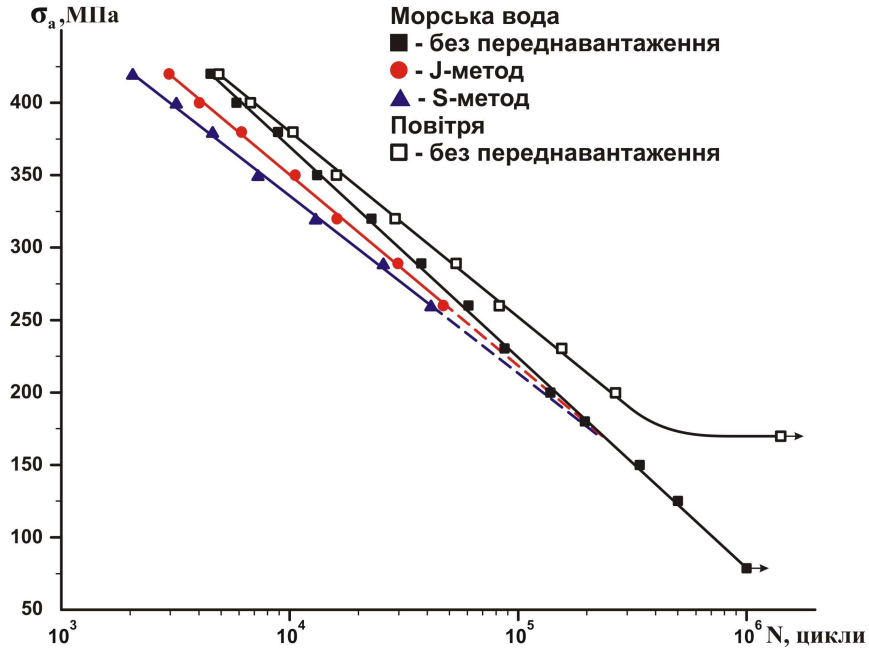


Рисунок 5 – Взаємне розташування ділянок кривих втоми та корозійної втоми зварного з'єднання з переднавантаженням S- і J-методом та без нього

остаточного руйнування зразка. Таким чином, протягом ІІІ-ї стадії штатна експлуатація трубопроводу є неможливою, оскільки вона може призвести до виникнення аварійної ситуації, і відповідно включати її тривалість в загальний ресурс роботи є недостатньо коректним. Тому суму тривалостей І та ІІ стадій запропоновано вважати ресурсом безпечної експлуатації $N_Б$, а суму відносних тривалостей І та ІІ стадій – відносним ресурсом безпечної експлуатації w.

Введене поняття ресурсу безпечної експлуатації дозволяє розділити повний період експлуатації на роботу в штатному режимі та живучість трубопроводу, тобто безаварійну роботу в режимі обмеженої або мінімальної функціональності, спричинену прискореним розвитком втомних (корозійно-втомних) тріщин. Запровадження таких підходів дозволить підвищити безпеку експлуатації морських нафтогазопроводів та мінімізувати ризики їх розгерметизації і руйнування, що сприятиме також підвищенню їх екологічної безпеки.

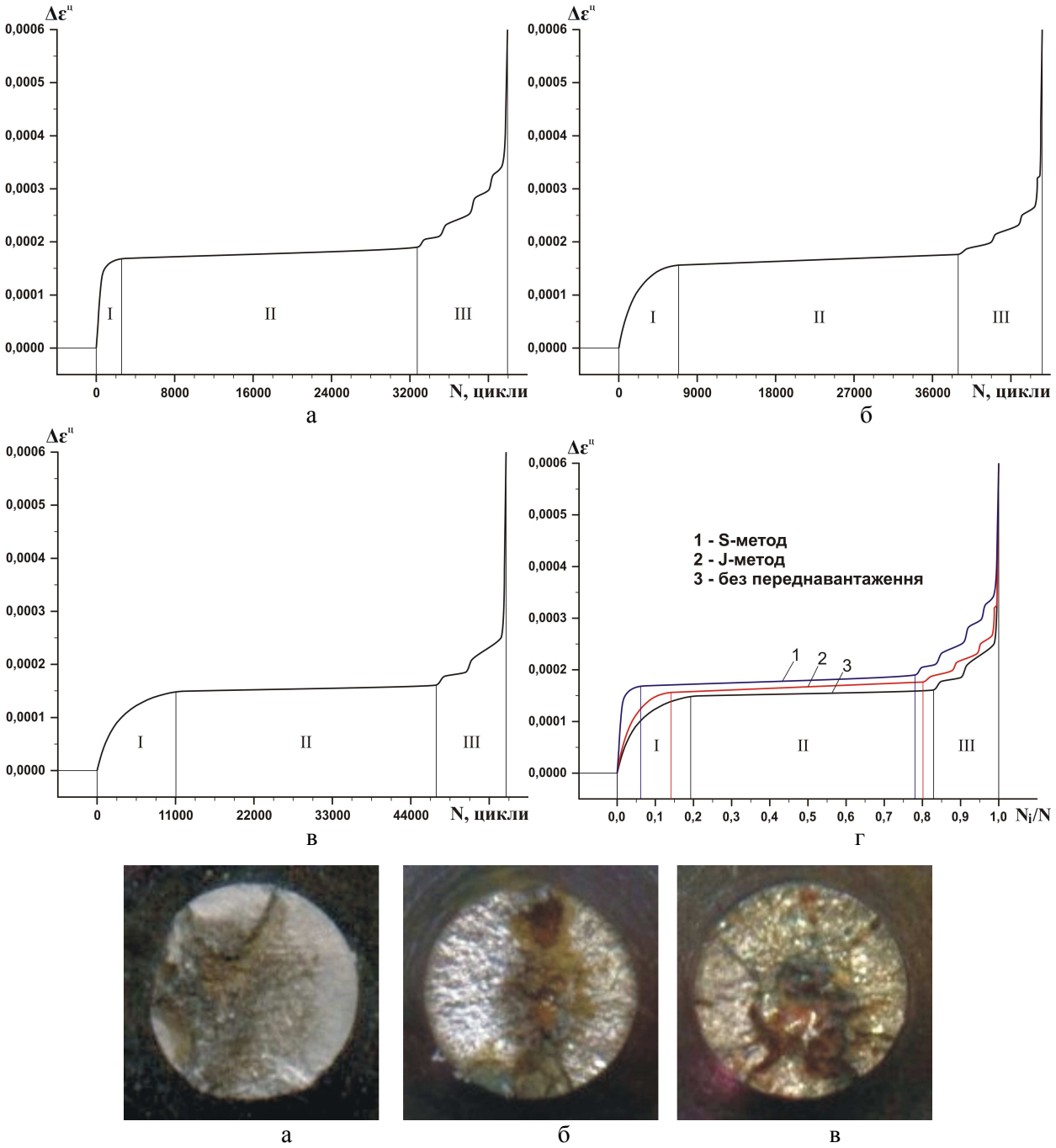
Макробудова зламів при корозійній втомі відрізняється від такої на повітрі, оскільки на неї суттєво впливають продукти корозії, перешкоджаючи змиканню берегів тріщини в циклі стиску. Також характерним тут є багатолопатевий вигляд зламу, пов'язаний з паралельним поширенням кількох магістральних тріщин. Як і у випадку випробовувань на повітрі, аналізуючи вигляд поверхонь руйнування спостерігаємо збільшення частки крихкого руйнування у переднавантежених зразків.

Як видно з одержаних результатів, передексплуатаційні навантаження зменшують відносний ресурс безпечної експлуатації сталі морських трубопроводів з пошкодженим ізоляційним покриттям при укладанні S-методом від 4,2 до 9,1%, а при укладанні J-методом – від 2,6 до 3,6 % (рис. 9, а).

Руйнування морських трубопроводів під час експлуатації доволі часто відбувається в області зварного з'єднання. При утворенні зварного шва (ЗШ) виникає ряд факторів, які сприяють концентрації корозійних уражень. До них відносяться неоднорідність складу і структури металу шва, наявність шлакових і газових включень, залишкових напружень, перегрів і перекристалізація внаслідок термічної дії зварювання [11].

Інтенсивна корозія зварного з'єднання пояснюється тим, що зона стику – це контакт двох металів (наплавленого і основного). Відмінності у складі та стуктурі ЗШ та основного металу труб, а також різні значення електродних потенціалів у морській воді можуть спричинити утворення макрогальванічної пари "ЗШ-основний метал". Якщо електродний потенціал ЗШ буде більш від'ємним, то виникне пара, в якій він буде анодом, а основний метал – катодом. Це дуже небезпечне явище, оскільки площа поверхні ЗШ значно менша за її значення для основного металу, більша площа поверхні якого полегшує деполяризацію катодного процесу. Корозійні процеси концентруються на ЗШ і спричиняють його швидке руйнування.

За результатами корозійно-втомних досліджень були побудовані криві втоми для зварного з'єднання трубопроводу в морській воді (для імітації роботи з пошкодженим ізоляційним покриттям) з урахуванням передексплуатаційних навантажень в процесі укладання трубопроводу S та J-методом та без них (рис. 5). Вони, як і дослідження на повітрі, підтверджують негативний вплив переднавантаження на загальну довговічність, який посилюється зі збільшенням рівня номінальних напружень. Якщо при σ_a = 260 МПа в процесі укладанні трубопроводу J- та S-методом довговічність зменшується в 1,15 та 1,30 разів (на 13,2 та 23,2 %), а

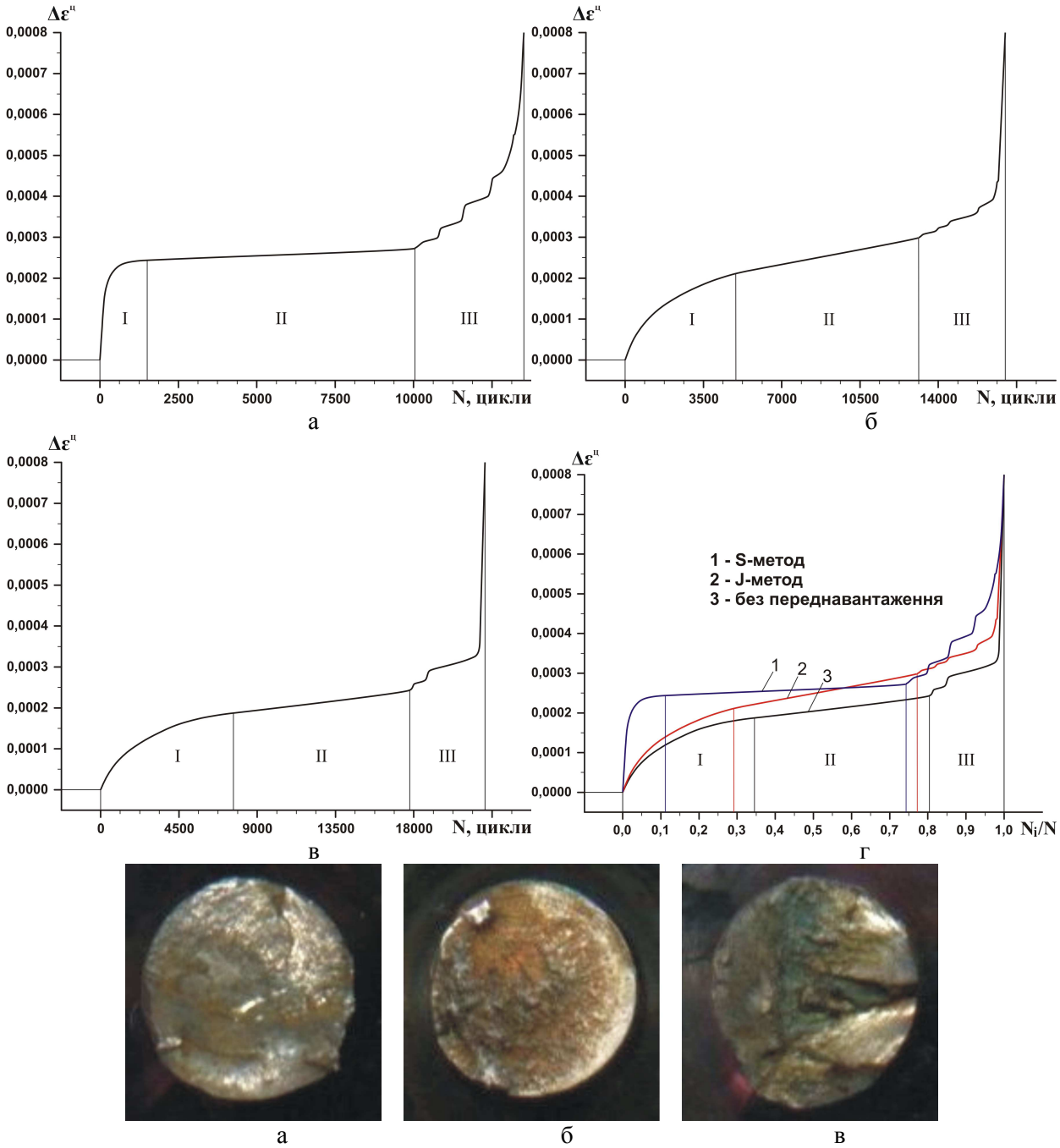


а б в

Рисунок 6 – Кінетика амплітуди циклічної деформації зварного з'єднання та вигляд поверхонь руйнування за рівня напружень 260 МПа з переднавантаженням S- (а), J-методом (б) та без нього (в) і в об'єднаному вигляді (г) у морській воді

при σ_a = 320 МПа – в 1,28 та 1,59 разів (на 21,9 та 36,9 % відповідно), то при σ_a = 420 МПа – в 1,52 та 2,20 разів (на 34,4 та 55,2 %) відповідно. При цьому умовна границя корозійної витривалості зварного з'єднання на базі 10^6 циклів дещо менша від такої для основного металу і складає $\sigma_{-1к}$=80 МПа.

При зниженні σ_a від 420 МПа довговічність зварного з'єднання в корозійному середовищі, у порівнянні з повітрям, зменшується більш істотно, ніж для сталі трубопроводу. Так, якщо за амплітуди напружень σ_a = 320 МПа довговічність зварного з'єднання з переднавантаженням J- і S-методом та без нього в морській воді порівняно з повітрям зменшується в 1,40, 1,43 та 1,39 разів (на 28,7, 29,9 та 28,1%), а при σ_a = 260 МПа – в 1,58, 1,59 та 1,61 разів (на 36,7, 37,1 та 37,9 %) відповідно, то при $\sigma_a = \sigma_{-1}$ – приблизно в 2 рази (так само, як і для сталі трубопроводу). Якщо ж порівняти довговічність зварного з'єднання з переднавантаженням J і S-методом та без нього у морській воді з довговічністю зварного з'єднання без переднавантаження на повітрі, то при σ_a = 320 МПа вона зменшиться в 1,78, 2,20 та 1,39 разів (на 43,8, 54,6 та 28,1 %), а при σ_a = 260 МПа – в 1,86, 2,10 та 1,61 разів (на 46,1, 52,3 та 37,9 %) відповідно.



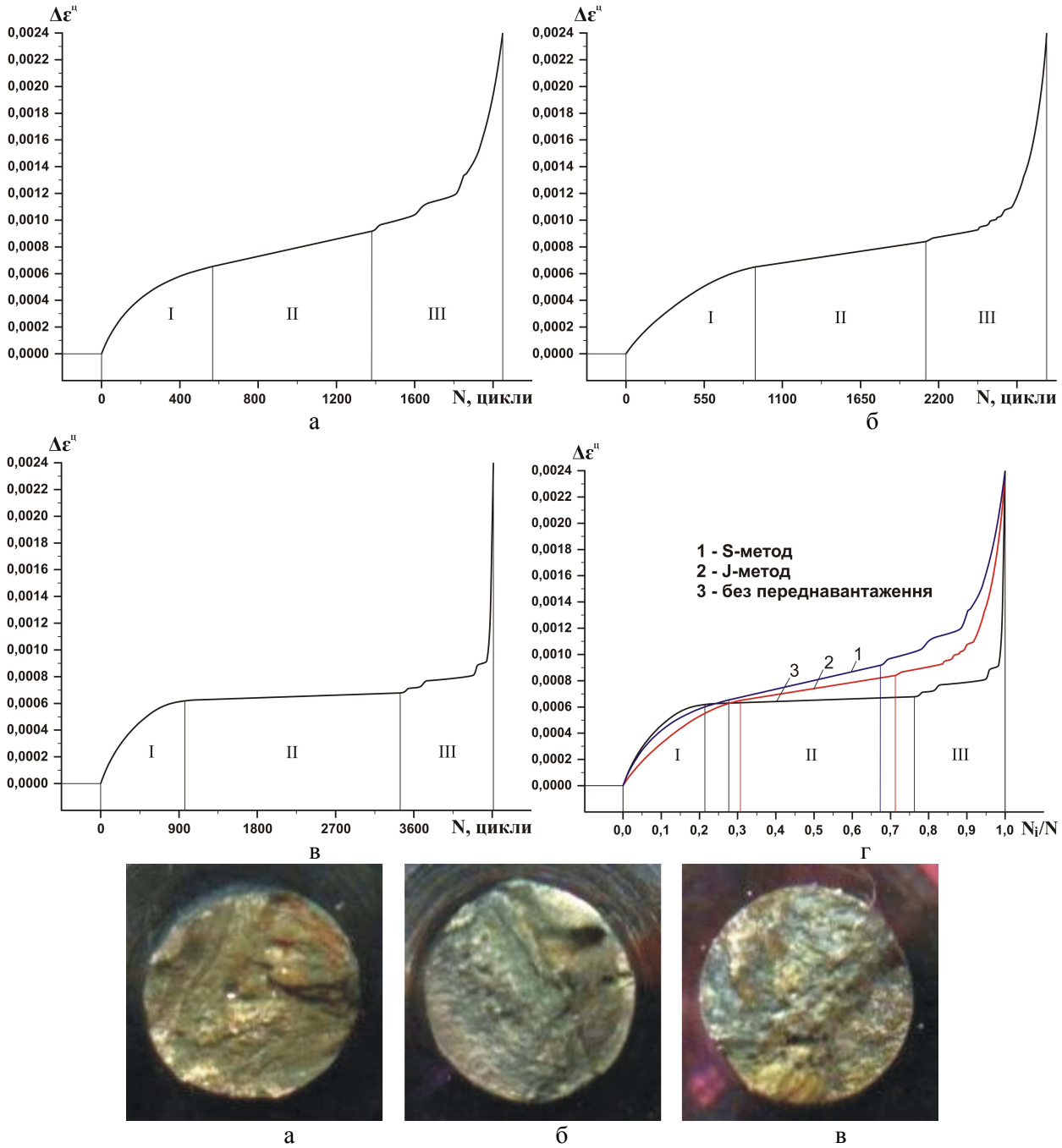
а б в

Рисунок 7 – Кінетика амплітуди циклічної деформації зварного з'єднання та вигляд поверхонь руйнування за рівня напружень 320 МПа з переднавантаженням S- (а), J-методом (б) та без нього (в) і в об'єднаному вигляді (г) у морській воді

Як і для основного металу, тут спостерігається незначний вплив передексплуатаційних навантажень на загальну довговічність зварного з'єднання, що зайвий раз доводить недостатність використання даного параметру при оцінці і прогнозуванні ресурсу експлуатації трубопроводу. Зокрема, порівняльний аналіз кінетики деформації та руйнування свідчить (рис. 2, 3, 4), що тривалість завершальної стадії становить від 18 до 34 %. Така похибка в оцінюванні ресурсу може призвести до виникнення аварійних ситуацій на пізній стадії експлуатації та істотно підвищувати рівень експлуатаційних ризиків.

Одержані за результатами корозійно-втомних досліджень досліджень кінетичні криві деформації зварного з'єднання з переднавантаженням S та J-методом та без нього (рис. 6, 7, 8) у морській воді вказують на зростання, порівняно з повітрям, тривалості I-ої стадії низькочастотної корозійної втоми для всіх досліджуваних амплітуд напружень. При цьому, для переднавантажених зразків при 420 МПа тривалість I-ї стадії корозійної втоми більша, ніж для зразків без попереднього навантаження. Внаслідок цього збільшення амплітуди стабілізації пластичної деформації на початку II-ї стадії спостерігається для всіх переднавантажених зразків.

Для випадку попереднього переднавантаження J-методом величина амплітуди стабілізації циклічної деформації порівняно зі зви-



а б в

Рисунок 8 – Кінетика амплітуди циклічної деформації зварного з'єднання та вигляд поверхонь руйнування за рівня напружень 420 МПа з переднавантаженням S- (а), J-методом (б) та без нього (в) і в об'єднаному вигляді (г) у морській воді

чайним навантаженням при випробовуваннях на рівні напружень 260 МПа, 320 МПа та 420 МПа зростає відповідно на 7,6, 18,1 та 14,9 %. Для випадку попереднього переднавантаження S-методом ця величина порівняно зі звичайним навантаженням при випробовуваннях на аналогічних рівнях напружень зростає відповідно на 16,5, 19,9 та 21,8 %. Також слід зазначити, що агресивна дія корозійно-активного середовища внаслідок причин, наведених вище, призводить до значно сильнішої інтенсифікації процесу циклічного деформування зварного шва і, як наслідок, зумовлює більш відчутне зростання амплітуди стабілізації циклічної деформації на початку II-ї стадії порівняно з основним металом у морській воді. Так, зростання амплітуди стабілізації циклічної деформації для всіх зразків з урахуванням передексплуатаційних навантажень в процесі укладання трубопроводу J та S-методом та без них в морській воді порівняно з повітрям складає при σ_a = 260 МПа 21,7, 19,6 та 27,9 %, при σ_a = 320 МПа – 29,6, 20,5 та 22,8 %, а при σ_a = 420 МПа – 68,2, 56,8 та 7,3 % відповідно. Даний висновок підтверджують побудовані за результатами корозійно-втомних випробувань діаграми циклічного кругового згину для зразків зі зварного з'єднання.

Аналіз поверхонь руйнування зразків зварного з'єднання дає змогу виокремити цікаві особливості. У високоамплітудній області

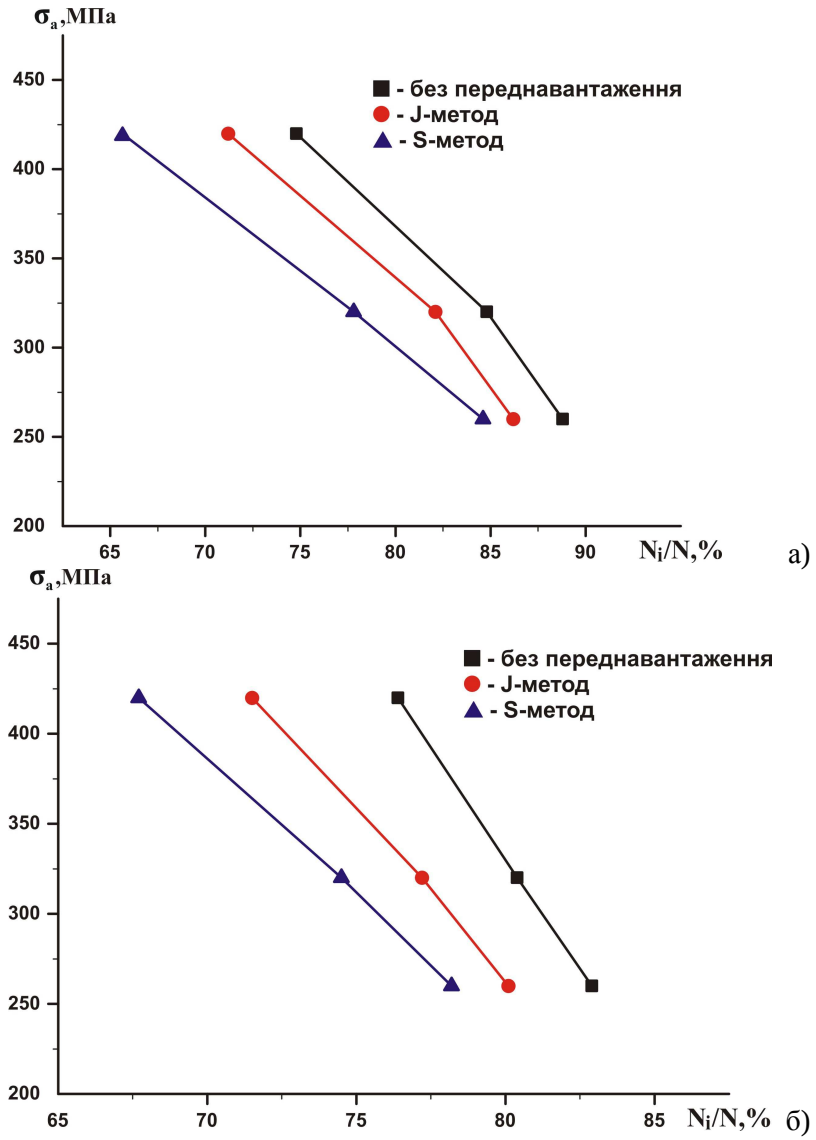


Рисунок 9 – Відносний ресурс безпечної експлуатації сталі 09Г2С (а) та зварного з'єднання (б) з переднавантаженням S- і J-методами та без нього в морській воді

спостерігаємо зменшення кількості тріщин, які одночасно поширюються, що свідчить про превалюючу роль механічного чинника та вичерпання ресурсу пластичності. В таких умовах у всіх випадках переважає крихкий механізм руйнування, який викликає розвиток однієї або двох корозійно-втомних тріщин. При переході в низькоамплітудну область (320, 260 МПа) фіксуємо схожу тенденцію тільки для переднавантажених зразків, які через зменшення ресурсу пластичності руйнуються за крихким механізмом. Для непереднавантажених зразків спостерігаємо класичний багатолопатевий корозійно-втомний злам (рис. 7, 8, в), причому із зменшенням амплітуди напружень кількість тріщин, які одночасно поширюються в декількох паралельних площинах, збільшується. Особливо наглядним цей процес є за рівня номінальних напружень 260 МПа. Така механіка руйнування підтверджує негативний вплив передексплуатаційних навантажень не тільки у пружнопластичній зоні, а й області близько та нижче границі плинності.

Під час аналізу процесу корозійно-втомного руйнування слід пам'ятати про схильність тріщин при цьому виді руйнування до розгалуження, затуплення та закриття. Підвищену схильність до розгалуження тріщин проявляє метал зварного з'єднання [11]. При цьому, фронт поширення тріщини перетинає зерна фериту.

Аналіз одержаних результатів свідчить (рис. 9,б), що передексплуатаційні навантаження зменшують відносний ресурс безпечної експлуатації морських трубопроводів з пошкодженим ізоляційним покриттям при укладанні S-методом від 4,7 до 8,7%, а при укладанні J-методом – від 2,8 до 4,9%.

Таким чином, за результатами корозійно-втомних випробовувань зразків основного металу та званого з'єднання морських трубопроводів встановлено закономірності впливу передексплуатаційних навантажень на опір корозійній втомі та ресурс безпечної експлуатації у середовищі морської води.

Висновки

1. Побудовано ділянки кривих корозійної втоми зразків основного металу та зварного з'єднання морських трубопроводів і вперше встановлено закономірності впливу передексплуатаційних навантажень у процесі укладання на корозійну витривалість матеріалу трубопроводу.

2. Вивчено вплив переднавантаження на деформаційну поведінку матеріалу лінійної частини та зварного з'єднання трубопроводу з пошкодженим ізоляційним покриттям.

3. Шляхом порівняльного аналізу поверхонь руйнування доведено негативний вплив переднавантаження, який полягає у вичерпанні ресурсу пластичності не тільки у високоамплітудній області, а і при рівнях номінальних напружень нижче границі плинності.

4. Експериментально доведено недостатність використання довговічності як базового критерію оцінки ресурсу роботи морських трубопроводів.

Література

1 Капустин К.Я. Строительство морских трубопроводов / К.Я. Капустин, М.А.Камышев. – М.: Недра, 1982. – 207 с.

2 Побережний Л.Я. Кінетика деформації та електродного потенціалу сталі трубопроводу при низькочастотному навантаженні у морській воді / Л.Я. Побережний // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2011. – №1. – С. 76-82.

3 Коррозионная усталость металлов: Тр. I сов.-англ. семинара / АН УССР, Физ.-мех. ин-т им. Г. В. Карпенко; под ред. акад. Я. М. Колотыркина. – К.: Наукова думка, 1982. – 372 с.

4 Крижанівський Є.І. Установка для комплексних досліджень малоциклової втоми матеріалу морських трубопроводів у робочих середовищах / Є.І.Крижанівський, Л.Я. Побережний // Нафтова і газова промисловість. – 2001. – № 5. – С. 44-45.

5 Побережний Л.Я. Вплив способу укладання на ресурс безпечної експлуатації морських трубопроводів / Л.Я. Побережний, Т.Ю. Пиріг // Вісник ТНТУ. – 2011. – Спец. вип., ч.1 – С. 101-106.

6 Ільницький М.К. Проектування, будівництво та експлуатація морських трубопроводів / М.К. Ільницький, О.Б. Шадрін. – К.: Українська книга, 1997. – 174 с.

7 Побережний Л.Я. Втомна довговічність та кінетика деформації матеріалу трубопроводу при низькочастотному навантаженні / Л.Я. Побережний, Т.Ю. Пиріг // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2012. – 3(44). – С. 87-96.

8 Улиг Г.Г. Коррозия и борьба с ней. Введение в коррозионную науку и технику / Г. Г. Улиг, Р. У. Реви; [пер. с англ. под ред. А. М. Сухотина]. – Л.: Химия, 1989. – 456 с.: ил.

10 Похмурский В. И. Коррозионная усталость металлов / В. И. Похмурский – М.: Металлургия, 1985. – 206 с.

11 Похмурський В.І. Адсорбційно-електрохімічна теорія корозійної втоми металів / В. І. Похмурський // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2010. – №2. – С. 21-30.

12 Махненко В. И. Ресурс безопасной эксплуатации сварных соединений и узлов современных конструкций / В. И. Махненко – К.: Наукова думка, 2006. – 620 с.

Стаття надійшла до редакційної колегії 14.02.13
Рекомендована до друку професором ***Грудзом В.Я.*** *(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)*
професором ***Букетовим А.В.*** *(Херсонська державна морська академія, м. Херсон)*

УДК 622.692.4

ОЦІНКА ВПЛИВУ ТЕПЛОВИХ ВТРАТ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ЕКСПЛУАТАЦІЇ СИСТЕМИ ГАЗОПОСТАЧАННЯ БУДИНКУ

Ю. І. Дорошенко, В. Б. Михалків

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 42166,
e-mail: x-55@list.ru

Актуальність теми теплових втрат та раціонального використання газу на даний час важко переоцінити. Зростання цін на енергоносії вимагає роз'вязання однієї із найважливіших задач - зниження енергозатрат на опалення в процесі експлуатації споруд.

Житлово-комунальний комплекс України займає третє місце після металургійної і хімічної промисловості за обсягами споживання енергоносіїв і перше місце – за споживанням тепла.

Виходячи з різних експертних оцінок, основний об'єм тепловтрат на опалення в будинках, тільки на фасадах будівель звичайної будови, складає від 35 до 45 відсотків.

Створення комфортного режиму у будинках і підтримання його сталим впродовж певного часу досягається неефективними методами: встановлюються додаткові обігрівачі чи холодильні установки, але усе це не усуває головної проблеми – високих тепловтрат.

Метою наукової роботи є дослідження доцільності та ефективності використання теплоізоляції, що полягає у вирішенні таких завдань: дослідження питань економії та комфорту; дослідження можливості збільшення терміну служби конструкцій; дослідження можливості збільшення внутрішньої площі будинку за рахунок використання теплоізоляції; позитивний екологічний вплив.

Об'єктом та предметом досліджень є властивості теплоізолюючих матеріалів житлових будівель та методи усунення тепловтрат.

Застосування сучасних технологій дає змогу скоротити затрати на опалення утричі. За результатами проведених розрахунків можна зробити основний висновок, що заміною котельного агрегату ми можемо досягти економії у 10÷15 % (або 20 ÷ 25 % у разі використання конденсаційних котлів), а грамотно утепливши будинок можна зменшити споживання природного газу в 2, а то й у 2,5 рази.

Ключові слова: тепловтрати, теплоізоляція, енергоспоживання, житлові будівлі, захисні конструкції, енерговитратність, енергозбереження.

Актуальность темы тепловых потерь и рационального использования газа на данный момент трудно переоценить. Рост цен на энергоносители подводит нас к необходимости решения одной из важнейших задач - снижения энергозатрат на отопление в процессе эксплуатации зданий.

Жилищно-коммунальный комплекс Украины занимает третье место после металлургической и химической промышленности по объемам потребления энергоносителей и первое место – по потреблению тепла.

Согласно результатам различных экспертных оценок, основной объем теплопотерь на отопление в домах, только на фасадах зданий обычного строения, составляет от 35 до 45 процентов.

Создание комфортного режима в домах и поддержания его долгое время достигается неэффективными методами: подключением дополнительных обогревателей или холодильных установок, однако все это не исключает главной проблемы – высоких теплопотерь.

Целью научной работы является исследование пользы и эффективности использования теплоизоляции, решения следующих задач: исследования вопросов экономии и комфорта, исследования возможности увеличения срока службы конструкций, исследования возможности увеличения внутренней площади здания за счет использования теплоизоляции; положительный экологический влияние.

Объектом и предметом исследований является теплоизоляционные материалы жилых зданий и теплопотери и методы их устранения.

Применение современных технологий позволяет сократить затраты на отопление в три раза. По результатам расчетов можно сделать основной вывод, что заменой котельного агрегата мы можем достичь экономии 10 ÷ 15% (или 20 ÷ 25% при использовании конденсационных котлов), то грамотно утеплив дом, можно уменьшить потребление природного газа в 2, а то и в 2 , 5 раза.

Ключевые слова: теплопотери, теплоизоляция, энергопотребления, жилые здания, ограждающие конструкции, энергозатратность, энергосбережение.

Nowadays the importance of the issue of the efficient gas utilization could be hardly overestimated. The price increase for energy resources demands one of the most important issue to be solved and namely to reduce energy consumption on heating in the process of facilities maintenance.

The housing and municipal complex in Ukraine takes the third place after metallurgical and chemical industries due to volumes of energy consumption and the first one according to heat consumption.

Taking into consideration different experts' assessments the main volume of heat losses for heating only on housefront of a common building accounts for 35 to 45 per cent.

Creating comfortable conditions in houses and keeping them constant during a certain period of time can be achieved by means of inefficient methods: additional heaters or conditioners are installed but all of them cannot remove the main problem we mean great heat losses.

The purpose of the scientific work is to research expedience and efficiency of heat-insulation usage based on solving the following challenges: research into issues of savings and comfort; research into possibility to increase the term of structures usage; research into possibility to increase the internal area of the building using heat-insulation; benefit environmental influence.

The object and subject of the research are properties of heat-insulation material for residential buildings and methods of removing heat losses.

Usage of modern technologies gives an opportunity to reduce expenditures on heating three times. According to the results of calculations it can be concluded that having changed a steam generating unit we can achieve savings 10÷15% (or 20÷50% in case of using condensa tion boilers) and having winterized (draft-proofed) a building for winter properly gas consumption can be reduced 2 or even 2.5 times.

Keywords: heat losses, heat-insulation, energy consumption, residential buildings, protective structures, energy losses, energy safe-keeping and integrity.

Актуальність теми. Серед найважливіших умов сталого та пропорційного розвитку держави є вирішення проблем енергоємності виробництва та енергозабезпечення економіки, які протягом останніх років були (і залишаються) загрозою економічної, а відтак і національної безпеки. Структурні та цінові диспропорції енергетичного балансу України суттєво посилюють ризики стабільного енергозабезпечення країни. Успішність політики енергоефективності у цьому контексті залежатиме від науково обгрунтованого економічного аналізу, прогнозування та оптимізації енергетичного балансу держави. Найбільш адекватною реакцією на сучасні виклики та загрози в енергетичній сфері для України мають стати радикальні структурні реформи одночасно у всіх напрямках енергетичної політики: енергоефективність, формування конкурентних енергетичних ринків, диверсифікація енергопостачання, збільшення в енергетичному балансі частки альтернативних джерел енергії та видів палива. Лише за таких умов країна матиме необхідний для стабільного соціально-економічного розвитку рівень національної енергетичної безпеки.

На сучасному етапі розвитку держави однією з основних перешкод для масштабної реалізації політики енергоефективності є відсутність у основних агентів нагальної потреби та мотивації щодо енергоефективних інноваційних технологій. Політичні, правові, економічні умови України дозволять їм здійснювати виробництво на старій, енерговитратній технологічній основі. Тому рівень використання потенціалу рушійної сили досягнення Україною світових стандартів енергоефективності є вкрай низьким для забезпечення швидкого якісного прориву. Водночас, без такого переходу до світових стандартів енергоефективності Україна не зможе забезпечити гідні темпи розвитку, енергетичну та економічну національну безпеку, вигідний вихід на світові ринки як конкурентоспроможної держави.

Світовий досвід упровадження енергоефективних технологій та застосування фінансово-економічних стимулюючих інструментів в інших країнах, усвідомлення політикумом і громадськістю ролі енергоефективності, організація результативної взаємодії між бізнесом, державою на принципах державно-приватного партнерства у впровадженні інноваційних енергоефективних технологій свідчить про те, що Україна має не тільки необхідність, а й можливість швидкого досягнення світових стандартів енергоефективності.

Світовий досвід переконливо доводить, що лише там відбулось швидке досягнення міжнародної конкурентоздатності держави, де наріжним каменем державної політики постала енергоефективність.

Загальна постановка задачі. Для економіки сучасної України характерна вкрай низька ефективність використання енергетичних ресурсів. Причиною цього є використання застарілого обладнання для виробництва електроенергії, а також значні її втрати під час транспортування та споживання.

Основним джерелом тепловтрат і шкідливих викидів у нашій країні є кінцеві споживачі енергії – житлові, комерційні, виробничі споруди. На їх опалення витрачається більше 40% всіх паливно-енергетичних ресурсів країни. При цьому значна частка енергоспоживання припадає на житлово-комунальний сектор і перевищує відповідні показники європейських країн більш ніж у два рази.

У найгіршому стані перебувають панельні будинки 50-70-х років. Саме вони найбільше втрачають тепла у холодну пору і є найбільш збитковими для житлового фонду. Обстеження цих будинків показали, що питоме споживання ними тепла перевищує споживання тепла сучасними будинками у два рази.

Розрахунок тепловтрат є найважливішим етапом проектування систем опалення. Для визначення теплової потужності, що покриває максимальне навантаження на систему опалення, необхідно знати тепловтрати будівлі в найсуворішу розрахункову частину холодного періоду року. Для вирішення питання про відповідність рівня теплоспоживання системою опалення будівлі сучасним вимогам, особливо враховуючи проблему енергозбереження, необхідно визначити тепловтрати будівлі за весь опалювальний період. Тепловтрати можна розрахувати не знаючи теплозахисних якостей огорож, коефіцієнтів теплообміну на поверхнях, розрахункових зовнішніх і внутрішніх умов. Тому в роботі досить велике місце приділено цим характеристикам.

Існують різні підходи до вибору розрахункових значень коефіцієнтів теплопровідності будівельних матеріалів. При цьому ретельність у виборі значення даного коефіцієнта вкрай важлива, беручи до уваги той факт, що виробники теплоізоляції часто в рекламних матеріалах часто вказують теплопровідність не за експлуатаційних умов, а в сухому стані. Необхідно також правильно оцінювати значення коефіцієнтів теплообміну на поверхнях огороджень, особливо коефіцієнта тепловіддачі на внутрішній поверхні, тому при завищеному його значенні буде завищена і розрахункова температу-

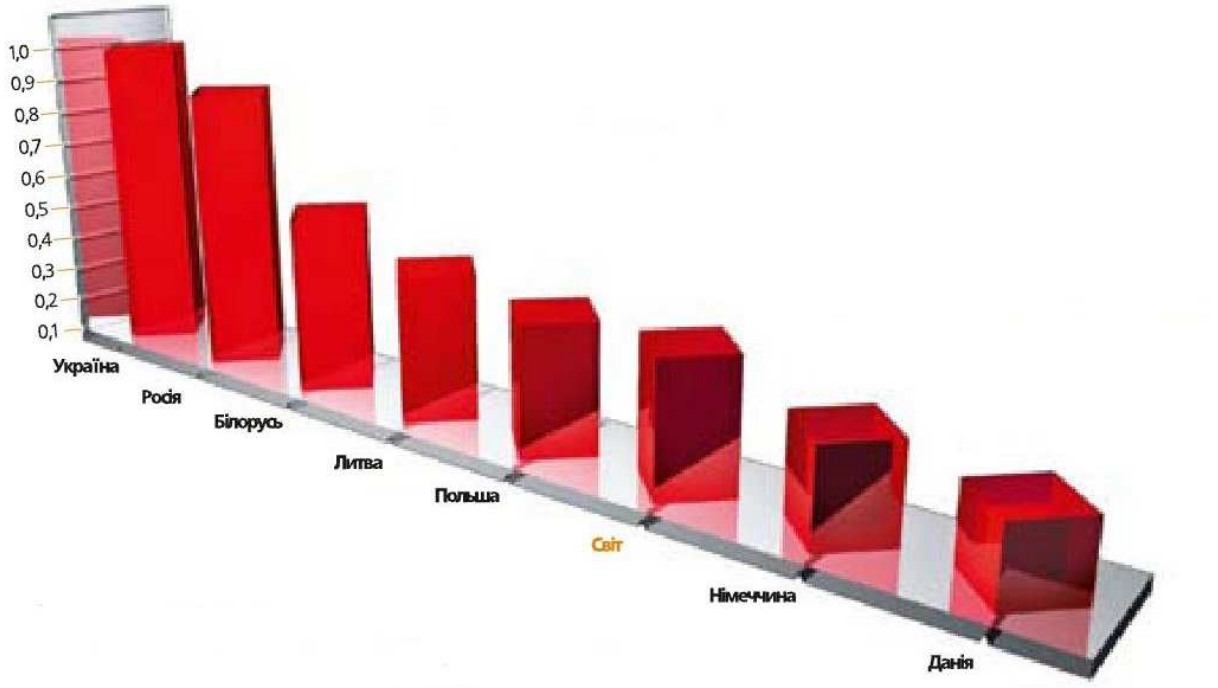


Рисунок 1 – Енергоспоживання в Україні на фоні інших країн

ра на внутрішній поверхні, наприклад, вікна. При визначенні тепловтрат будівлі важлива правильна оцінка коефіцієнтів теплопередачі огороджувальних конструкцій.

Тепловтрати в будівлях відбуваються, переважно, у вигляді дисперсії тепла зовнішніми огородженнями, що виникає і підсилюється з наростанням різниці температури повітря з внутрішнього і зовнішнього боку житла, а також в результаті посиленої інфільтрації зовнішнього (і відповідно, ексфільтрації внутрішнього) повітря під тиском вітру і внаслідок виникнення в забудові різних аеродинамічних ефектів (ефектів "кута", "вихрового ролика", Вентурі, "зв'язки", "отворів", "каналізації" тощо, які виникають, як вказують дослідження, за висоти забудови більше 15 м).

Україна споживає в 2,4 рази більше енергії, ніж в середньому у світі, і в 3,1 рази більше, ніж країни Європейського Союзу. Показники енергоефективності нашої країни набагато нижчі, ніж у найбільших країнах, що розвиваються, – Китаї, Індії, Бразилії.

Оскільки сучасна цивілізація не може відмовитись від споживання енергії, єдиним виходом з цієї ситуації є її раціональне споживання, засноване на використанні відновлювальних джерел енергії, економії енергоресурсів та впровадження енергоефективних технологій.

Зважаючи на те, що будинки – одні із найбільших споживачів енергії, енергозбереження в будівництві набуває особливого значення.

В той час, як високоефективні котли та термостати забезпечують нас якісним теплом, саме "розумна" теплоізоляція оптимізує роботу цих пристроїв. Вона зберігає це тепло всередині, тим самим знижуючи рівень теплових втрат.

В умовах зростаючих цін на енергоносії теплоізоляція є одним з найпростіших рішень зберегти тепло в наших оселях, знизити шкідливий вплив на довкілля і разом з тим заощадити кошти на опалення. На рисунку 1 наведено показники енергоспоживання в Україні на фоні інших держав за даними Міністерства палива та енергетики України.

Для вирішення проблеми надмірного енергоспоживання державою впроваджено нові будівельні норми, якими висуваються значно вищі вимоги до теплоізоляції споруд.

Так, в нових будівельних нормах ДБН В.2.6-31:2006 "Конструкції будівель та споруд. Теплова ізоляція будівель", що вступили в дію з 1 квітня 2007 р., вимоги до теплоізоляції нових будинків та будинків, що підлягають реконструкції, збільшені на 20-40%.

Це значить, що нові будинки будуть втрачати значно менше теплової енергії, ніж старі, а, отже, мешканці менше сплачуватимуть за спожите тепло.

Щодо вже існуючих будинків, то рішення про необхідність утеплення свого будинку кожен власник повинен прийняти сам, задавшись питанням – "А що теплоізоляція дасть мені?".

Огляд публікацій щодо питання дослідження. Теплова ізоляція колекторів систем опалення в неопалювальних приміщеннях та теплова ізоляція циркуляційних трубопроводів системи гарячого водопостачання, зменшення втрат теплової енергії з поверхні були досліджені згідно з вимогами СНиП 2.04.05-91 "Отопление, вентиляция и кондиционирование".

Зовнішнє утеплення стін для збільшення термічного опору теплопередачі зовнішніх стін, підвищення теплозахисних характеристик зовнішніх стін, теплова ізоляція перекриття, теплова ізоляція перекриття над неопалювальними підвалами і проїздами було розглянуто згідно з

вимогами ДБН В.2.6-31:2006 “Теплова ізоляція будівель”.

Дослідження режимів теплопостачання включає вирішення таких завдань: аналіз розподілу потоків теплоносія (води), визначення теплових втрат магістральних теплопроводів, розрахунок теплових втрат по будинку в цілому і в окремо взятих квартирах, розрахунок рівноважних температур приміщень, аналіз ефективності проведення енергозберігаючих заходів, та інших.

В ході написання роботи було опрацьовано і використано інформацію доповідачів Національної доповіді з питань реалізації державної політики енергоефективності “Енергоефективність як ресурс інноваційного розвитку”.

Мета досліджень. Метою наукової роботи є дослідження користі та ефективності використання теплоізоляції, що полягає у вирішенні наступних задач:

– дослідження питань економії та комфорту;

– дослідження можливості збільшення терміну служби конструкцій;

– дослідження можливості збільшення внутрішньої площі будинку за рахунок використання теплоізоляції;

– позитивний екологічний вплив.

Об’єктом досліджень є теплоізолюючі матеріали житлових будівель.

Предметом досліджень є тепловтрати та методи їх усунення.

Методи дослідження. Обробка результатів теоретичних досліджень виконувалась із використанням:

– скінченно-об’ємних методів розв’язання рівнянь газодинаміки;

– методів модульного та об’єктно-орієнтовного програмування;

– методів математичної статистики.

За статистичними даними, крізь стіни та дахи втрачається до 50% тепла. Раціональне використання теплоізоляційних матеріалів в будівництві дасть змогу зберегти тепло та зменшити витрати на опалення на 50-70%. На рисунках 2–4 наведено фотографії дослідження тепловтрат будинку тепловізором.



Рисунок 2 – Фотографія дослідження тепловтрат типового будинку тепловізором

Тепловізійне обстеження нерухомості в світі – сучасний метод дистанційної діагностики. Він вирізняється незаперечними перевагами перед іншими відомими способами діагностики.

Практика обстеження будинків тепловізорами свідчить, що зазвичай з причини помилок і недбальства будівельників шість будинків із десяти перевірених несуть колосальні втрати тепла.

Абсолютно будь-який прихований дефект в конструкції будівель буде відображений на термограмі приладу. Такий прилад не здатний що-небудь приховувати або обманювати. Тепловізор показує саме те, що є насправді.



Рисунок 3 – Тепловізійна зйомка одноповерхового будинку

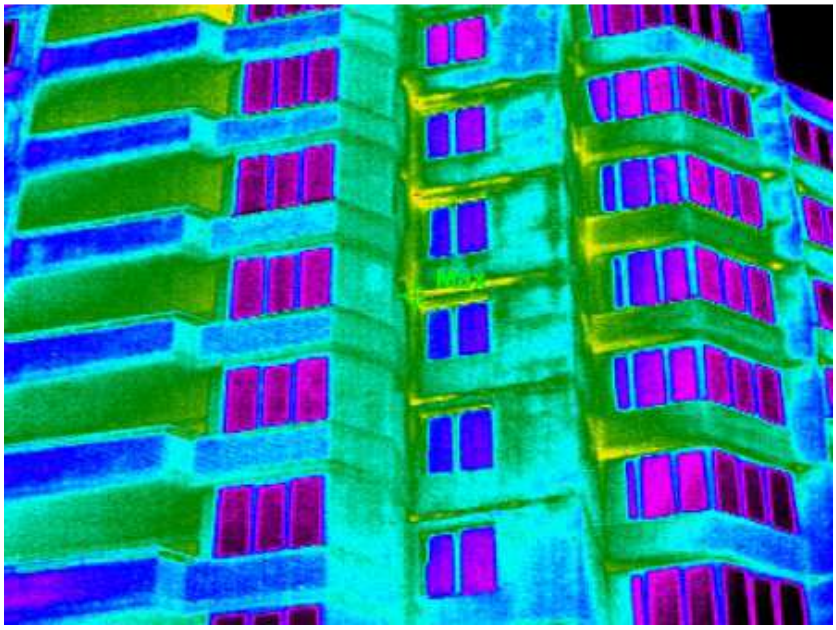
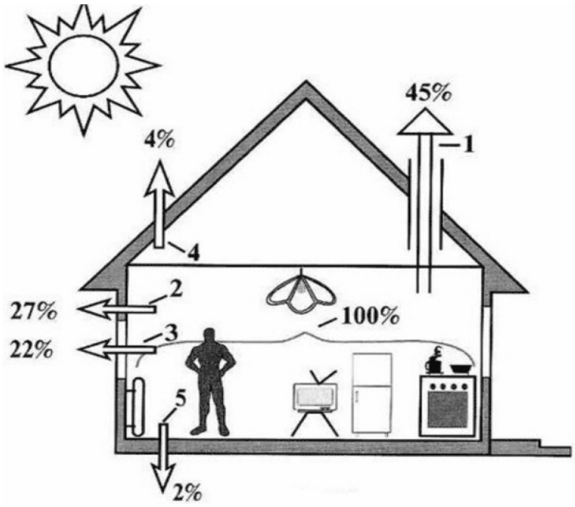


Рисунок 4 – Тепловізійна зйомка багатоповерхового будинку

На основі детального огляду літератури з даного питання можна навести приблизну структуру теплового балансу житлового будинку в опалювальний період (рис. 5).



1 – втрати тепла за рахунок повітрообміну;
2 – втрати тепла через зовнішні стіни;
3 – втрати тепла через вікна;
4 – втрати тепла через дах;
5 – втрати тепла через підлогу

Рисунок 5 – Приблизна структура теплового балансу житлового будинку в опалювальний період

Перевірка будинку тепловізором та усунення місць теплових втрат назавжди позбавить власника від подальших непотрібних фінансових витрат. Це й економія на опаленні будинку, яка може скласти до 65-70%. В модернізованих будинках сильно зростає ступінь комфортності, а також зручність життя, оскільки значно рідше виникає потреба у проведенні поточного ремонту, значно поліпшується стан всіх несучих конструкцій будинку, що значною мірою впливає на довговічність будинку загалом.

Здорожчання газу, прогнози фахівців на холодні зими не дають приводу для подальшого оптимізму. На рисунку 6 відображено динаміку зростання та прогнозу ціни на газ в Україні за даними аналізу фахівців Науково-технічного центру “Біомаса”.

Як зменшити споживання газу не втративши в тепловому комфорті?

Будь-яка система опалення працює на підтримку того рівня теплового комфорту в приміщенні, який влаштовує господаря, тобто котел і система опалення лише компенсує теплові втрати. Висновок простий - зменшуючи теплові втрати, ми зменшуємо об’єми споживання газу. І якщо вдається зменшити тепловтрати в 2 рази, то і економія газу буде дворазовою.

Розглянемо спрощену методику визначення теплових втрат у будинку та оцінки їх впливу на енергоспоживання. Для цього сформуємо загальну схему системи опалення будинку (рис. 7).

Коефіцієнт корисної дії котла обчислюється за формулою:

$$ККД = \frac{Q_{повн} - Q_{втр.кот}}{Q_{повн}} = \frac{Q_{кор}}{Q_{повн}}, \qquad (1)$$

де $Q_{повн}$ – тепло, що виділяється за рахунок спалення газу;

$Q_{втр.кот}$ – тепло, шо втрачається з викидними газами.

Система набуває теплової рівноваги у випадку

$$Q_{т.в} = Q_{кор}\ , \qquad (2)$$

де $Q_{т.в}$ – тепловтрати у будинку;

$Q_{кор}$ – корисна потужність.

Повні тепловтрати будівлі складаються з тепловтрат через захисні конструкції і затрат на інфільтрацію

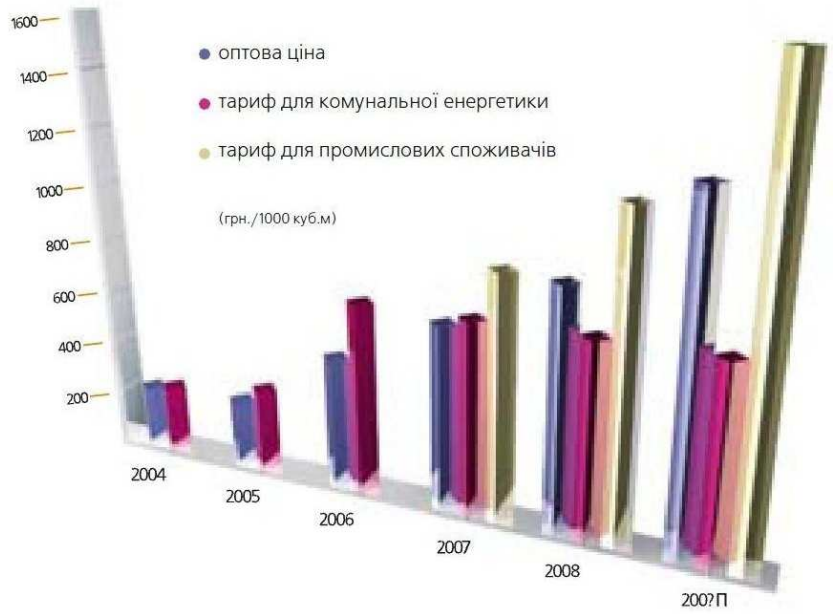
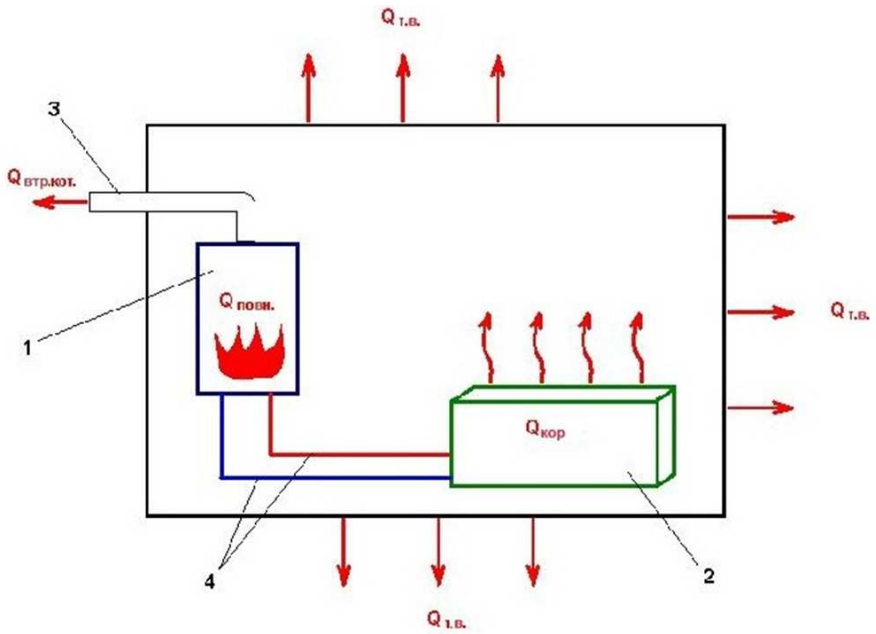


Рисунок 6 – Ціни на газ в Україні



1 – котел; 2 – опалювальні прилади; 3 – викидний патрубок; 4 – трубопроводи

Рисунок 7 – Система опалення будинку

$$\sum Q = Q_{ок} + Q_{інф}\,, \qquad (3)$$

які обчислюються за формулами описаними нижче.

Тепловтрати через захисні конструкції обчислюються за формулою

$$Q_{ок} = 1{,}1\cdot\left(P\cdot H\cdot\left(k_{стн} + g\left(k_в - k_{стн}\right)\right) + S\cdot\left(0{,}6\cdot k_{під} + 0{,}9\cdot k_{стл}\right)\right)\cdot\left(t_в - t_з\right), \qquad (4)$$

де P – периметр будівлі, м;

S – площа захисної конструкції (наприклад стіни), м^2;

H – висота будівлі, м;

$k_{стн}$, $k_в$, $k_{стл}$, $k_{під}$ – відповідно коефіцієнти теплопередачі зовнішніх стін, вікон, стель, підлоги, Вт/(м°С);

g – відношення площі вікон до площі стін;

$t_в$ – розрахункова внутрішня температура, °С;

$t_в - t_з$ - різниця температур внутрішнього і зовнішнього повітря, С;

$t_з$ – розрахункова зовнішня температура, °С.

Тепловтрати через інфільтрацію

$$Q_{інф} = 0{,}24\cdot\left(S - B\cdot P\right)\cdot H\cdot\left(t_в - t_з\right), \qquad (5)$$

де B - товщина стіни, м.

Розглянемо приклад розрахунку тепловтрат через стіну до і після застосування тепло-

ізоляції. Скористаємось наступною спрощеною формулою для обчислення тепловтрат

$$Q_{т.в} = k \cdot S \cdot (t_в - t_з), \qquad (6)$$

де k – коефіцієнт теплопередачі захисних конструкцій.

Аналізуючи цю формулу, бачимо, що зменшити теплові втрати через стіну можна двома способами. Перший – зменшити різницю температур (шляхом зниження температури повітря в приміщенні, оскільки зовнішню температуру ми змінити не можемо). Однак цей варіант неприйнятний, адже навряд чи комусь захочеться жити в приміщенні з температурою +12, навіть значно заощаджуючи при цьому на опаленні. Другий варіант зниження тепловтрат – зменшення коефіцієнта теплопередачі стіни k. Як цього досягти? Дуже просто, вже існуючу стіну слід покрити шаром теплоізоляції.

Формула для розрахунку коефіцієнта теплопередачі

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{вн}} + \sum \frac{d}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_з}}, \qquad (7)$$

де $\alpha_{вн}$ - коефіцієнт тепловіддачі з внутрішньої сторони стіни, Вт/(м^2·С);

$\alpha_з$ - коефіцієнт тепловіддачі із зовнішнього боку стіни, Вт/(м^2·С);

d - товщина однорідного шару в багатошаровій стіни, *м*;

λ – коефіцієнт теплопровідності даного шару, (м·С) / Вт.

Збільшуючи товщину шару (товщину стіни) або вибираючи матеріал для шару з меншим значенням коефіцієнта теплопровідності λ, ми зменшуємо коефіцієнт k, а, отже, і тепловтрат. Іншими словами, якщо нам вдасться знизити коефіцієнт теплопередачі k в два рази, то тепловтрати через дану конструкцію також зменшаться удвічі.

За описаним вище алгоритм та згідно основних вимог нормативної документації можна дослідити оцінку впливу тепловтрат на експлуатаційні характеристики житлових будівель та запропонувати найбільш оптимальні методи, щоб запобігти їм. Із цією метою проведемо розрахунок тепловтрат житлового будинку.

Зовнішня стіна довжиною 4м висотою 3м складається з цегляної кладки товщиною 50 см (кладка в дві цегли, цегла червона повнотіла на цементно-піщаному розчині). Шаром внутрішньої цементної штукатурки, товщиною 1 см можна знехтувати. Коефіцієнт теплопровідності такої кладки $\lambda = 0{,}8$ Вт/(м^2·С). Коефіцієнт теплопередачі такої стіни:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{8{,}7} + \frac{0{,}5}{0{,}8} + \frac{1}{23}} = 1{,}3 \text{ Вт/(м}^2\text{·С)}.$$

Тепловтрати через стіну за різниці температур 40^{o}С (на вулиці -20 в приміщенні+20):

$$Q_{т.п.} = 1{,}3 \cdot (3 \cdot 4) \cdot 40 = 624 \; Вт.$$

Тепер, якщо розглянуту стіну іззовні утеплити за допомогою мінеральної вати або скловати товщиною шару 5 см, теплопровідність стане $\lambda = 0{,}045$ Вт/(м^2·С).

Коефіцієнт теплопередачі утепленої стіни

$$k = \frac{1}{\frac{1}{8{,}7} + \frac{0{,}5}{0{,}8} + \frac{0{,}05}{0{,}0045} + \frac{1}{23}} = 0{,}53 \text{ Вт/(м}^2\text{·С)}.$$

Тепловтрати через утеплені стіни складе:

$$Q_{т.п.} = 0{,}53 \cdot (3 \cdot 4) \cdot 40 = 254 \; Вт.$$

Різниця в тепловтратах до утеплення і після складає

ΔQ т.п. = 624 - 254 = 370 Вт.

Як ми бачимо, утеплення - дуже ефективний спосіб зменшення споживання природного газу.

За нормами ДБН В.2.6-31: 2006 “Конструкції будинків і споруд. Теплова ізоляція будівель” для кліматичної зони І (центральна північна та східна частина країни) повинні забезпечуватися такі коефіцієнти теплопередачі для приватних будинків (таблиця 1).

У таблиці 2 наведено коефіцієнти теплопередачі для різних теплоізолюючих матеріалів.

Як бачимо, товщина теплоізоляції зовнішньої стіни не повинна бути меншою 100 мм. Витрати на теплоізоляцію зовнішніх стін складаються з вартості матеріалів (теплоізоляція, штукатурні суміші, сітка, дюбелі, декоративне оздоблення) і вартість робіт. Як свідчить практика, різниця між загальними витратами у разі використання теплоізоляції товщиною 50 мм і 100 мм буде близько 10%, а за ефективністю відрізнятися в півтора рази. Збільшення товщини теплоізоляції понад 150 мм є економічно невигідним. Загальна вартість буде зростати набагато швидше, ніж ефект від економії тепла. Отже, оптимальною товщиною теплоізоляції при утеплення зовнішніх стін (при використанні теплоізоляції з коефіцієнтом теплопровідності $\lambda \leq 0041$ Вт /(м·С)) є 100 ... 150 мм.

Нанесення теплової ізоляції на 150 м трубопроводів-колекторів системи опалення діаметром 50 мм у підвалі п’яти-типоверхового 45-кв. будинку за умови середньої температури води у трубопроводі +40^{0}С дає можливість отримати річну економію теплової енергії на потреби опалення у 33,7 Гкал, що еквівалентно заощадженню 10 000 грн. на рік.

Серед чинників, що негативно впливають на енергоефективність економіки України, слід вказати на: домінування в галузевій структурі енергоємних виробництв; зношеність основних фондів підприємств та, відповідно, великі зайві втрати енергоносіїв та енергії; недостатня оснащеність виробництва і невиробничої сфери (в першу чергу, житлового фонду) сучасними приладами обліку; брак інвестицій; недостатнє нормативно-правове та інституційне забезпечення політики енергоефективності. Вказані вище чинники призводять до зниження конкурентоздатності вітчизняної продукції на внутрішньому і зовнішньому ринках.

Таблиця 1 – Нормативні значення коефіцієнтів теплопередачі і термічного опору для приватних житлових будинків

Вид конструкції	Значення Rq min, $м^2 \cdot С/Вт$, не менше	Значення k (1/Rq min) $Вт/(м^2 \cdot С)$, не більше
Зовнішні стіни	2,8	0,36
Дахи та перекриття неопалюваних горищ	4,95	0,2
Перекриття над неопалюваними підвалами, розташованими нижче рівня землі	3,75	0,27
Перекриття над проїздами і холодними підвалами, які межують із зовнішнім повітрям	3,5	0,29

Таблиця 2 – Коефіцієнти теплопередачі за різного виду утеплення цегляної стіни

Вид теплоізоляції	Коефіцієнт теплопередачі, Товщина теплоізоляції, мм			
	0	50	100	150
Пінопласт ПСБ — 25, λ = 0,038 Вт/м·С	2,2	0,56	0,32	0,23
Скловата ISOVER OL-E, λ = 0,041 Вт/м·С	2,2	0,59	0,34	0,24

Енергозбереження в будівлях – проблема досить актуальна на сьогодні, а до її розв'язання слід застосувати системний підхід. Використання активних й пасивних систем зберігання теплової енергії в малоповерхових будинках на сьогодні є не тільки бажаним, але і необхідною умовою виконання діючих норм з теплоспоживання. Рішення про енергетичну ефективність будівель має прийматися на основі комплексної оцінки будинку як енергоспоживаючої системи.

Основними чинниками енергоефективності є якість теплового захисту захисних конструкцій, забезпечення вимог теплового комфорту приміщень, використання енергозберігаючих систем, технологій та заходів.

Згідно з результатами досліджень впливу використання теплоізолюючих матеріалів у житлових будинках можна стверджувати про їх високу ефективність у зменшенні тепловтрат будівлі через захисні конструкції.

Для правильного вибору потужності котла та обігрівальних приладів необхідно розраховувати реальні тепловтрати приміщень будинку.

Теплові втрати залежать насамперед від:

– різниці температур всередині та ззовні будинку (чим різниця більша, тим втрати вищі);

– теплозахисних властивостей стін, вікон, перекриттів, покриттів (захисних конструкцій).

Вартість теплоізоляції відносно вартості будинку досить мала, однак у ході експлуатації будівлі основні затрати припадають саме на опалення. На теплоізоляції у жодному випадку не можна економити, особливо для комфортного проживання на великих площах. Ціни на енергоносії у всьому світі підвищуються, тому питання енергозатратності є актуальним.

Сучасні будівельні матеріали мають більш високі термічні опори, ніж традиційні. Вони дозволяють робити стіни тоншими, а, значить, дешевшими та легшими. Усе це добре, але в тонких стін менша теплоємність, тобто вони гірше запасають тепло. Опалювати доводиться постійно – стіни швидко нагріваються та швидко вистигають. У старих будівлях з товстими стінами влітку прохолодно, так як стіни накопичують за ніч холод, а вдень нагріваються.

Утеплення необхідно розглядати в комплексі із повітропроникністю стін. Якщо підвищення теплового опору стін пов'язано із значним зменшенням повітропроникності, то не слід його застосовувати.

Дуже часто, неправильне застосування теплоізоляції призводить до погіршення санітарно-гігієнічних властивостей житла.

Зовнішнє утеплення стін є набагато ефективнішим за внутрішнє.

Основним резервом енергозбереження є вентиляція.

Застосувавши сучасні технології виготовлення вікон, низькотемпературні обігріваючі системи, ефективну теплоізоляцію захисних конструкцій, можна скоротити затрати на опалення у три рази.

Відома технологія створення "теплого будинку" за рахунок пінополістирольних блоків. З цих блоків спочатку формується стінова конструкція, опалубка. Потім всередину порожніх пінополістирольних блоків заливається бетон. Це дає змогу перетворити будинок на монолітну ґратчасту конструкцію з теплоізолюючим прошарком як ззовні, так і зсередини. Зовнішній шар теплоізоляції перешкоджає переохолодженню бетону у холодні пори року. Внутрішня ізоляція запобігає непродуктивним витратам теплоти на нагрівання масивних бетонних конструкцій.

Для запобігання втратам тепла через вікна одночасно з тришаровим склінням зараз широко використовуються склопакети. Віконні системи на основі склопакетів розподіляються на три групи: пластикові, алюмінієві та дерев'яні. Віконні системи на основі полівінілхлоридних профілів можуть формуватися з використанням теплоізоляційних матеріалів та армуватися металом для посилення несучих властивостей більших поверхонь. Алюмінієві віконні системи для підвищення теплоізоляції вимагають також використання теплоізолюючих матеріалів. Вік-

на з металевим профілем, враховуючи їх міцність та хімічну стійкість, найкраще використовувати у промислових і адміністративних будинках.

Тепловізійне обстеження будівель і споруд - це сучасний метод отримання достовірної інформації і визначення дефектів будівництва. Робота проводиться з використанням спеціальних приладів - тепловізорів, які вловлюють витік тепла і складають візуальну "карту тепловтрат". Своєчасне обстеження дозволяє здійснювати контроль якості робіт на кожному етапі будівництва. За його результатами можна визначити наявність тріщин в конструкціях, порожнечі в стиках панелей, недостатню товщину (а іноді і відсутність) утеплювальних матеріалів. Такий контроль дає змогу виявити неякісне встановлення дверних і віконних блоків. Отримані дані вказують на рівень існуючих тепловтрат, який потім можна порівняти з нормативами.

Проведене тепловізійне обстеження дасть значний економічний ефект (десятки тисяч гривень на один будинок), дозволить заощадити кошти і матеріали на ремонт. Проведення тепловізійних обстежень має широкий суспільний резонанс, привертає увагу мешканців мікрорайонів і громадськості, привчає їх до розуміння проблеми енергозабезпечення, економії ресурсів, оцінці об'єктивності вибору рішення адміністрацією міста, енергетиків, ЖКГ та інших служб.

Ось чому для забезпечення високої ефективності реконструкції житлових будівель в рамках енергозберігаючих заходів важливе місце займає попереднє обстеження захисних конструкцій, що включає візуальний огляд та комплексні теплофізичні вимірювання.

Провівши комплекс розрахунків, можна зробити основний висновок, що заміною котельного агрегату ми можемо досягти економії 10÷15% (або 20 ÷ 25% при використанні конденсаційних котлів), то грамотно утепливши будинок, можна зменшити споживання природного газу в 2, а то й у 2,5 рази.

Поряд із утепленням будинку та врахуванням теплових режимів зовнішнього повітря необхідно здійснювати технічно грамотну експлуатацію будинків для підтримання комфортних умов проживання із одночасним впровадженням енергозберігаючих заходів та економією тепла, а отже і газу.

Таким чином, паралельно з розробкою енергоефективних технологій необхідно проводити і організаційно-правові, економічні та інформаційні заходи, метою яких з одного боку є підвищення рівня комфортабельності, життєзабезпечення і безпеки житла, а з іншого - перетворення комунального теплопостачання в прибуткову сферу економіки. Саме цим питанням практичного характеру і буде присвячена наступна робота.

Література

1 Славянская Л. Мировой рынок нефти: состояние и перспективы // Нефтегазовая вертикаль. – 2001. – №16. – С. 50.

2 ДБН В.2.6-31: 2006. Теплова ізоляція будівель. МБАЖКГ України. – К, 2006.

3 СНиП 2.04.05-91*. Отопление, вентиляция и кондиционирование. Госстрой России. М., 1999.

4 Енергоефективність як ресурс інноваційного розвитку: Національна доповідь про стан та перспективи реалізації державної політики енергоефективності у 2009 році / С. Ф. Єрмілов, Ю. П Ященко, В. В. Григоровський, В. М. Геєць, В. Е. Лір та ін. – К.: НАЕР, 2009. – 58 с.

5 Ратушняк Г.С. Енергозбереження та експлуатація систем теплопостачання / Г. С. Ратушняк, Г.С. Попова. – Вінниця: ВДТУ, 2002. – 120 с.

6 Табунщиков, Ю. А. Энергоэффективные здания / Ю. А. Табунщиков [и др.]. – М.: АВОК–ПРЕСС, 2003. – ISBN 5-94533-007-8.

7 Богословский В. Н. Тепловой режим здания / В. Н. Богословский. – М.: Стройиздат, 1979. – 248 с.

8 Власов О. Е. Основы строительной теплотехніки / О. Е. Власов. – М.: ВИА РККА, 1938. – 90 с.

9 Ананьев А. И. Теплотехнические показатели строительных материалов и конструкцій / А. И. Ананьев, О. А. Хоров, Л. Д. Евсеев [и др.] // Строительный експерт. – 2005. – № 16(203). – С. 17-23.

10 Эккерт Э. Р. Теория тепло- и массообмена / Э. Р. Эккерт, Р. М. Дрейк. – М.: Энергоиздат, 1961. – 681 с.

11 Шкловер А. М. Основы строительной теплотехники жилых и общественных зданий / А. М. Шкловер , Б. Ф. Васильев, Ф. В. Ушков. – М.: Госстройиздат, 1956. – 350 с.

12 Михеев М. А. Основы теплопередачи / М. А. Михеев. – М.: Госэнергоиздат, 1956. – 392 с.

13 Малявина Е.Г. Учет теплопоступлений в помещения при расчете годового энергопотребления здания / Е. Г. Малявина, С. В. Бирюков // Стройпрофиль. – 2005. – №2/1. – С. 38-40.

Стаття надійшла до редакційної колегії 23.01.13
Рекомендована до друку професором ***Грудзом В.Я.*** *(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)*
д-ром техн.. наук ***Банахевичем Ю.В.*** *(ДК «Укртрансгаз», м. Київ)*

УДК 621.318.122

ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ МАТЕРІАЛУ ПОСТІЙНИХ МАГНІТІВ ДЛЯ ЛОВИЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ

Т.Л. Романишин

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 42353,
e-mail: t a r a s r o m a n u s h u n @ g m a i l . c o m

Описано умови експлуатації ловильного інструменту, визначено чинники, які впливають на стабільність магнітних параметрів пристроїв, встановлено вимоги до їх магнітних систем. Проведено порівняльний аналіз характеристик основних класів сучасних магнітотвердих матеріалів, визначено ефективну область їх застосування у магнітних ловильних пристроях залежно від умов експлуатації. Встановлено критерії та обґрунтований вибір раціонального різновиду постійних магнітів для систем уловлювачів. Наведено криві розмагнічування рідкоземельних магнітів системи неодим-залізо-бор марок N48, N42SH та феритових магнітів марки 28БА190. Показано вплив температури на характеристики магнітних матеріалів. Проведено розрахунок магнітних полів елементарних систем із рідкоземельними і феритовими магнітами методом скінченних елементів. Обґрунтовано доцільність використання високоенергетичних магнітів у системах ловильних пристроїв.

Ключові слова: крива розмагнічування,магнітна індукція, магнітна система, рідкоземельний матеріал.

Описаны условия эксплуатации ловильного инструмента, определены факторы, влияющие на стабильность магнитных параметров устройств, установлены требования к их магнитным системам. Проведен сравнительный анализ характеристик основных классов современных магнитотвердых материалов, определена эффективная область их применения в магнитных ловильных устройствах в зависимости от условий эксплуатации. Установлены критерии и обоснованный выбор рационального вида постоянных магнитов для систем ловителей. Приведены кривые размагничивание редкоземельных магнитов системы неодим-железо-бор марок N48, N42SH и ферритовых магнитов марки 28БА190. Показано влияние температуры на характеристики магнитных материалов. Проведен расчет магнитных полей элементарных систем изредкоземельными и ферритовыми магнитами методом конечных элементов. Обоснована целесообразность использования высокоэнергетических магнитов в системах ловильных устройств.

Ключевые слова: кривая размагничивания, магнитная индукция, магнитная система, редкоземельный материал.

Operation conditions for magnetic fishing tool are described; factors affecting the stability of the magnetic device parameters are identified; requirements for their magnetic systems are established. A comparative analysis of the main classes of modern hard-magnetic materials characteristics is conducted. Effective range of application magnetic materials in magnetic fishing devices is determined, with operation conditions in view. Selection criteria are determined, based on which the choice of the appropriate type of permanent magnets to be used in magnetic fishing tool systems is proven. Demagnetization curves of rare-earth neodymium iron boron magnets of grades N48, N42SH and ferrite magnets of grade 28BA190 are presented. The action of temperature on the characteristics of the magnetic materials is established. Finite element method based calculation of the magnetic fields of elementary systems with rare-earth and ferrite magnets are presented. Applicability of high-energy magnets in magnetic fishing tools systems is validated.

Keywords: demagnetization curve, magnetic flux density, magnetic system, rare-earth material.

Процес спорудження нафтогазових свердловин супроводжується періодичними відмовами та поломками бурового інструменту, в результаті чого на вибої залишаються різні за формою і масою металеві уламки [1, 2]. Одним із найбільш ефективних способів очищення вибоїв свердловин від стороннього металу є застосування магнітних ловильних пристроїв, які уловлюють феромагнітні предмети без їх попереднього руйнування.

Магнітний ловильний пристрій призначений для роботи у свердловинах в умовах високих гідростатичних тисків (до 100 МПа), температур (до 520 К), вібрацій, ударів, агресивного феромагнітного середовища та високої зашламованості металевими уламками [3]. Складні умови експлуатації пристрою вимагають створення такої конструкції, яка б володіла високими силовими і магнітними характеристиками у важких свердловинних умовах та відповідала наступним вимогам:

– магнітна система повинна володіти максимально можливою вантажопідйомною силою (максимальне значення питомої вантажопідйомної сили може досягати 234 Н/см^2 [3]) і бути стійкою до дії розмагнічуючих чинників;

– конструкція магнітної системи повинна бути достатньо міцною та корозійностійкою до дії агресивного середовища, забезпечувати мінімальне розсіювання магнітного поля;

– магнітні ловильні пристрої повинні якісно і з мінімальними витратами часу очищувати вибій свердловини від металевих предметів, що володіють магнітними властивостями, не залежно від їх геометричної форми.

Важливу роль на етапі конструювання магнітної системи відіграє вибір матеріалу для постійних магнітів. Постійні магніти – це попередньо намагнічені тіла із магнітного матеріалу, що володіють значною залишковою індукцією та є джерелами постійних магнітних полів. Магнітотверді матеріали – матеріали для

Таблиця 1 – Значення магнітних параметрів сплавів альніко [5]

Марка сплаву	Залишкова магнітна індукція B_r,		Коерцитивна сила за індукцією H_{cB},		Максимальний енергетичний добуток $(BH)_{\max}$,	
	кГс	Тл	кЕ	кА/м	МГсЕ	кДж/м^3
ЮНДК24	12,3	1,23	0,55	44	4,0	32
ЮН15ДК24	11,5	1,15	0,65	52	4,6	36
ЮН14ДК24Т2	11	1,1	0,75	60	3,7	30
ЮН14ДК25БА	12,8	1,28	0,77	62	6,6	56
ЮНДК31Т3БА	11,5	1,15	1,15	92	8	64
ЮНДК35Т5БА	10,5	1,05	1,4	110	10	80

Примітки: 1. Значення магнітних величин наведені в системах СГСМ та СІ.
2. У сплавів ЮНДК величина коерцитивної сили за індукцією H_{cB} практично не відрізняється від значення коерцитивної сили за намагніченістю H_{cJ}, тому вказується тільки величина H_{cB}.

постійних магнітів, в яких значення коерцитивної сили $H_c > 4$ кА/м [4].

Критерії вибору матеріалу постійних магнітів для систем ловильних пристроїв можна сформулювати так:

– можливість створення максимального магнітного поля за мінімальних розмірів системи;

– стійкість до дії підвищеної і пониженої температур, зовнішніх магнітних полів та інших розмагнічуючих чинників;

– простота у виготовленні та невисока вартість.

Питаннями вибору постійних магнітів для магнітних систем ловильних пристроїв займалися такі науковці, як Червінський В.П., Гаврась В.А., Курніков Ю.А., Кобилянський М.Т., Романишин Л.І. Але з часу їх досліджень відбулися значні зміни в технології виготовлення магнітотвердих матеріалів, що значно здешевили постійні магніти та дозволили знайти їх широке використання, в тому числі і в системах ловильних пристроїв. З'являються нові марки постійних магнітів із значно кращими характеристиками, проводяться дослідження з розробляння нанокомпозитних магнітних матеріалів. Тому основна увага в даній статті приділена властивостям сучасних матеріалів, а також доцільності їх використання в магнітних системах ловильних пристроїв.

Згідно із класифікацією С.В. Вонсовського [4], в основі якої закладено відмінності в хімічному складі, природі висококоерцитивного стану та технології виготовлення, магнітотверді матеріали поділяються на 4 групи:

– магнітотверді матеріали системи ЮНДК (альніко);

– магнітотверді ферити;

– рідкоземельні магнітотверді матеріали;

– композиційні магнітотверді матеріали.

Найбільш важливими характеристиками магнітотвердих матеріалів є коерцитивна сила H_c, залишкова магнітна індукція B_r, робоча температура T_p, а також максимальний енергетичний добуток $(BH)_{\max}$, який визначає магнітну енергію $W_{\max}$. Чим вища магнітна енергія, тим менше потрібно об'єму магнітотвердого матеріалу для створення максимального значення магнітного поля в робочому зазорі.

В тридцяті роки XX ст. були розроблені сплави альніко, що дало можливість розширити область застосування постійних магнітів у вантажопідйомних пристроях. Їх виготовляють литтям або спіканням із сплавів алюмінію, нікелю і кобальту з додаванням різноманітних хімічних елементів (мідь, ніобій, кремній, титан).Магнітні характеристики сплавів альніко, що використовуються у свердловинних ловильних пристроях наведено в таблиці 1.

Основні переваги альніко – це достатня механічна міцність, високе значення залишкової магнітної індукції B_r, стабільність магнітних властивостей в широкому діапазоні температур. Магніти альніко найбільш термостабільні серед всіх видів магнітів і можуть використовуватися без значної втрати властивостей при температурі до 500-600 °С. Це дало можливість створити на їх основі в СРСР, США та інших країнах магнітні ловильні пристрої для очищення свердловин від металу.

Так у 1971 році в АзІНМаш (Азербайджан) були розроблені магнітні фрезери на постійних магнітах із сплаву ЮНДК24 шести типорозмірів від 145 мм до 394 мм. Вантажопідйомна сила ловильних пристроїв знаходилась в межах від 0,5 кНдо 1,8 кН. Створення нових магнітних матеріалів з кращими характеристиками, а також якісні зміни в конструкції дозволили освоїти з 1976 року серійний випуск магнітних фрезерів за ОСТ 26-16-1606-76 діаметрами від 86 мм до 315 мм з вантажопідйомною силою від 0,4 кН до 12 кН [6].

Один із світових лідерів по виробництву ловильних інструментів – американська компанія "Bowen" (з 2000 року входить до складу "NationalOilwellVarco") також використовує постійні литі магніти у магнітних пристроях. Вантажопідйомна сила уловлювачів діаметрами

Таблиця 2 – Магнітні параметри магнітотвердих феритів [9]

Марка фериту	Залишкова магнітна індукція B_r,		Коерцитивна сила за індукцією H_{cB},		Коерцитивна сила за намагніченістю H_{cJ},		Максимальний енергетичний добуток $(BH)_{max}$,	
	кГс	Тл	кЕ	кА/м	кЕ	кА/м	МГсЕ	кДж/м^3
18БА220	3,3	0,33	2,64	210	2,76	220	2,26	18
22БА220	3,6	0,36	2,7	215	2,76	220	2,76	22
24БА210	3,7	0,37	2,57	205	2,64	210	3,02	24
28БА190	3,8	0,38	2,32	185	2,38	190	3,52	28
22РА220	3,6	0,36	2,7	215	2,76	220	2,76	22
24РА230	3,6	0,36	2,76	220	2,89	230	3,02	24
25РА170	3,8	0,38	1,82	145	1,88	150	3,14	25
29РА240	4	0,4	2,92	232	3,02	240	3,64	29
21СА320	3,4	0,34	3,02	240	4,02	320	2,64	21
24СА190	3,7	0,37	2,32	185	2,38	190	3,02	24
28СА250	3,9	0,39	3,02	240	3,14	250	3,52	28
10КА165	2,3	0,23	1,8	143	2,07	165	1,25	10
11КА135	2,4	0,24	1,59	127	1,69	135	1,38	11
14КА135	2,8	0,28	1,59	127	1,69	135	1,76	14

Примітка. Літери в позначеннях означають: БА – ферит барію анізотропний; РА – ферит змішаний, барієво-стронцієвий, анізотропний; СА – ферит стронцію анізотропний; КА – ферит кобальту анізотропний.

від $3^1/_4$ дюймів (82,5 мм) до 19 дюймів (482,6 мм) складає відповідно від 0,86 кН до 23 кН [7].

Незначна вантажопідйомна сила уловлювачів пояснюється низьким значенням енергетичного добутку $(BH)_{max}$ сплавів альніко, максимальне значення якого становить 80 кДж/м^3 та значними потоками розсіювання. Крім цього, у литих магнітів є ще один недолік – низька коерцитивна сила, що призводить до втрати їх магнітних і силових характеристик під час експлуатації та зберігання. Тому магнітні системи з магнітами цього класу повинні намагнічуватися в зібраному стані, також необхідно періодично відновлювати їх властивості при експлуатації.

Тобто, єдиною можливою конструкцією магнітної системи з використанням магнітів із сплавів альніко може бути високий феромагнітний стакан з циліндричними магнітами всередині. При оптимальних розмірах такої системи питома вантажопідйомна сила знаходиться в межах 60-65 Н/см^{2}при максимально можливому значенні 234 Н/см^2[8].Це означає, що використовувати литі магніти в системах ловильних пристроїв неефективно.

Наступний клас магнітних матеріалів – магнітотверді ферити. Практичне застосування знайшли ферити барію та стронцію з гексагональною кристалічною структурою та ферити кобальту з кубічною структурою. Внаслідок феримагнетизму ці з'єднання володіють низькою індукцією насичення, проте висока кристалографічна анізотропія дозволяє отримати високу коерцитивну силу. Завдяки високій коерцитивній силі феритові магніти стійкі до розмагнічування, що дає можливість намагнічувати їх окремо до збирання системи без погіршення параметрів. Це дозволяє, на відміну від магнітів альніко, розробляти будь-які конфігурації магнітних систем.

Феритові магніти характеризуються високою корозійною і структурною стабільністю, екологічно безпечні і можуть використовуватися практично без обмежень в часі. Вони зберігають свої основні магнітні параметри при експлуатації протягом не менше 25 років, при цьому зміни залишкової індукції, коерцитивної сили за індукцією та намагніченістю, магнітної енергії не повинні перевищувати 0,5 % [9]. Статичні та динамічні навантаження не викликають жодних змін магнітних характеристик аж до руйнування магнітів. Магнітні системи на феритових магнітах працюють при температурах до 300 °С без втрати властивостей.

Марки та властивості феритів барію і стронцію визначаються і контролюються згідно ГОСТ 24063-80 "Ферриты магнитотвердые. Марки и основне параметры" та ОСТ 11 707.023-81 "Ферриты магнитотвердые прецизионные. Марки и основне параметры".

В таблиці 2 наведено основні магнітні параметри магнітотвердих феритів деяких марок.

Недоліком феритових магнітів є суттєва залежність коерцитивної сили від температури, що обмежує використання цих магнітів при значних від'ємних температурах. Ферити крихкі, володіють великою твердістю та недостатньою міцністю. Крім того, внаслідок пористої структури феритових магнітів, їх потрібно оберігати від потрапляння в пори вологи та її замерзання.

На базі систем із постійних феритових магнітів в ІФНТУНГ були розроблені пристрої для очищення вибоїв свердловин від металу типу УОЗ дев'яти типорозмірів із зовнішнім діаметром від 92 мм до 270 мм. Їх особливістю стала ефективна конструкція магнітної системи. Паралельне з'єднання постійних магнітів в системах забезпечило високу вантажопідйомність шляхом концентрації магнітного потоку на робочій поверхні і практично відсутність магнітного поля на боковій циліндричній поверхні. Розроблені пристрої володіють умовною вантажопідйомною силою від 2,6 кН до 19 кН, що в 2-3 рази перевищує показники магнітних фрезерів на основі сплаву альніко. В магнітних системах пристроїв УОЗ використовувалися феритові магніти марок 28БА190 та 22РА220 [3].

Низькі значення залишкової індукції феритів зумовлюють особливості конструкції силових магнітних систем з концентраторами магнітного потоку. Це дозволяє створювати в робочому зазорі магнітну індукцію значно більшу, ніж у системах на литих магнітах. Тому вантажопідйомна сила пристроїв з постійними феритовими магнітами також буде більшою.

До магнітних матеріалів з високою коерцитивною силою відносяться сплави Ag-Mn-Al та Pt-Co, що містять дорогоцінні метали (через високу вартість вони не знайшли застосування) та матеріали з високою константою магнітокристалічної анізотропії – так звані рідкоземельні магнітотверді матеріали.

Рідкоземельні магніти – це магніти, що виготовляються з додаванням елементів лантаноїдної групи. Найчастіше використовуються при виготовленні постійних магнітів самарій (Sm) і неодим (Nd). Існує велика кількість сумішей та сплавів з використанням цих елементів, проте широкого розповсюдження набули сплави самарій-кобальт (SmCo) та неодим-залізо-бор (Nd-Fe-B).

Промислове виробництво магнітів із сплаву SmCo розпочалося в 1980-х роках. За поєднанням магнітних властивостей вони значно перевищують феритові матеріали. Так, самарієві магніти мають залишкову магнітну індукцію B_r до 1,15 Тл, коерцитивну силу H_{cB} в межах 460-800 кА/м, енергетичний добуток $(BH)_{max}$ матеріалів сполуки $SmCo_5$ досягає 190 кДж/м^3, а сполуки Sm_2Co_{17} – 260 кДж/м^3. Перевагами самарієвих магнітів також є відмінна корозійна стійкість, стабільність магнітних параметрів за температур до 350 °С. Певний час конкурентів за магнітними властивостями в рідкоземельних магнітів SmCo не було. Перешкодою до широкого використання сплавів самарій-кобальт у магнітних системах уловлювачів є їх висока вартість,яка, однак, в міру вдосконалення технології виготовлення постійних магнітів постійно зменшується.

На сьогоднішній день, найвищими магнітними параметрами володіють спечені рідкоземельні магніти сплаву $Nd_2Fe_{14}B$. Залишкова магнітна індукція цих матеріалів може досягати значення $B_r = 1{,}47$ Тл, а енергетичний добуток $(BH)_{max} = 420$ кДж/м^3. Неодимові магніти дешевші, ніж самарієві завдяки відсутності в їх складі достатньо дорогого металу – кобальту.До недоліків слід віднести невисоку робочу температуру деяких марок, а також низьку корозійну стійкість, яка усувається покриттям поверхні магнітів захисними шарами міді, цинку, нікелю, хрому.

Магнітні параметри деяких марок рідкоземельних матеріалів Nd-Fe-B наведені в таблиці 3.

Завдяки високим магнітним властивостям, використання матеріалів Nd-Fe-B дозволяє суттєво зменшити габарити існуючих магнітних систем та створити більш компактні ловильні пристрої з мінімальною площею полюсів магнітів. Для пристроїв, призначених для роботи в глибоких свердловинах потрібно використовувати постійні неодимові магніти, леговані диспрозієм, що збільшує максимальну температуру використання магнітної системи до 200 °С.

Четверта група матеріалів - композиційні магнітотверді матеріали. Їх виготовляють на основі порошків магнітотвердих матеріалів однієї із груп (альніко, ферити,рідкоземельні матеріали Nd-Fe-B і Sm-Co, а також їх комбінації) і полімерної зв'язки. Як зв'язуючий компонент можуть використовувати пластмаси або каучук, відповідно матеріали називають магнітопластами або магнітоеластами. Переваги цих матеріалів – технологічність виготовлення та оброблення, пластичність, низька трудомісткість виготовлення магнітів складних форм. Взагалі композиційні матеріали володіють фізичними властивостями, що типові для зв'язуючого компонента. Проте вони мають і ряд недоліків. Робочі температури магнітопластів низькі в порівнянні з робочими температурами спечених магнітів. Верхня температурна межа використання встановлюється температурним станом зв'язуючого компонента (зазвичай ця величина складає від 80 ºС до 220 ºС). Крім того, магнітні параметри значно нижчі, ніж у спечених магнітних матеріалів. Так, наприклад, максимальний енергетичний добуток для композиційних рідкоземельних магнітів складає лише 90 кДж/м^3.

Відомі ловильні пристрої на рівні винаходів, в магнітних системах яких використовують композиційні магнітотверді матеріали [11].

Порівняльний аналіз основних характеристик магнітних матеріалів, зображений на рисунку 1, дозволив встановити наступне:

- магнітотверді матеріали на основі рідкоземельних металів володіють більш високими магнітними параметрами в порівнянні з магнітами альніко за рахунок високої коерцитивної сили, а в порівнянні з феритами – за рахунок високої залишкової індукції;

- енергетичний добуток $(BH)_{max}$ магнітів Nd-Fe-B в 10-15 разів,самарій-кобальтових – у 6-10 разів вищий, ніж у феритових;

- рідкоземельні магніти дорожчі за феритові в десятки разів.

Таблиця 3 – Магнітні параметри матеріалів Nd-Fe-B [4, 10]

Марка	Залишкова магнітна індукція B_r, Тл	Коерцитивна сила за індукцією H_{cB}, кА/м	Коерцитивна сила за намагніченістю H_{cJ}, кА/м	Максимальний добуток $(BH)_{max}$, кДж/м^3	Максимальна робоча температура T_p, °С
N30	1,08-1,12	780-836	≥ 955	223-239	80
N42	1,29-1,32	860-955	≥ 955	318-334	80
N48	1,42-1,47	860-995	≥ 955	380-422	80
N33M	1,14-1,17	820-876	≥ 1114	247-263	100
N40M	1,26-1,29	860-955	≥ 1114	303-318	100
N48M	1,37-1,42	860-995	≥ 1114	358-382	100
N27H	1,02-1,06	756-804	≥ 1353	199-215	120
N38H	1,22-1,26	860-915	≥ 1353	287-303	120
N42H	1,29-1,32	860-955	≥ 1353	318-334	120
N30SH	1,08-1,12	804-844	≥ 1592	223-239	150
N42SH	1,29-1,32	860-955	≥ 1592	318-334	150
N45SH	1,32-1,37	860-955	≥ 1592	342-358	150
N25UH	0,98-1,02	732-764	≥ 1990	183-199	180
N33UH	1,14-1,17	820-876	≥ 1990	247-263	180
N38UH	1,22-1,26	860-915	≥ 1990	287-303	180
N28EH	1,04-1,08	780-812	≥ 2388	207-223	200
N33EH	1,14-1,17	820-876	≥ 2388	247-263	200
N35EH	1,17-1,21	860-915	≥ 2388	263-279	200

Примітка. Літери M, H або поєднання букв SH, UH чи EH вказують на максимальну температуру використання, яка становить 100, 120, 150, 180 або 200 °С.

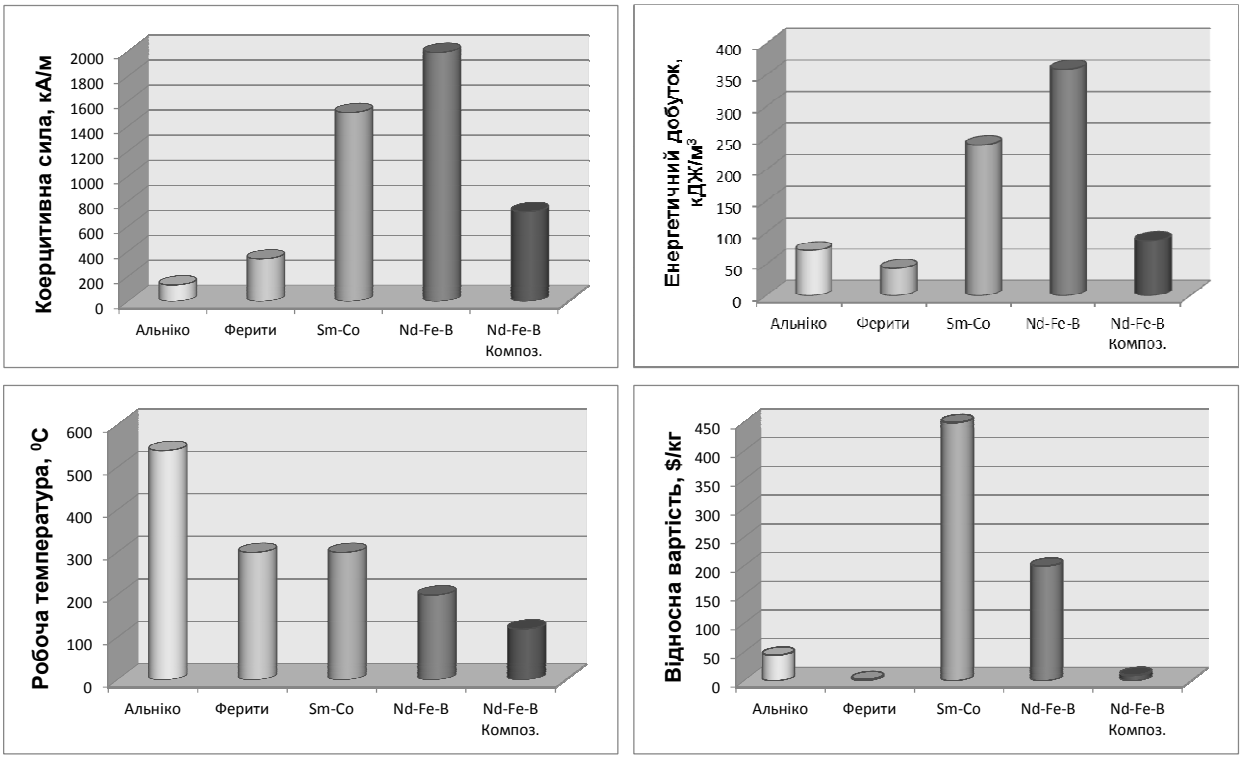


Рисунок 1 – Порівняльні діаграми основних характеристик магнітотвердих матеріалів

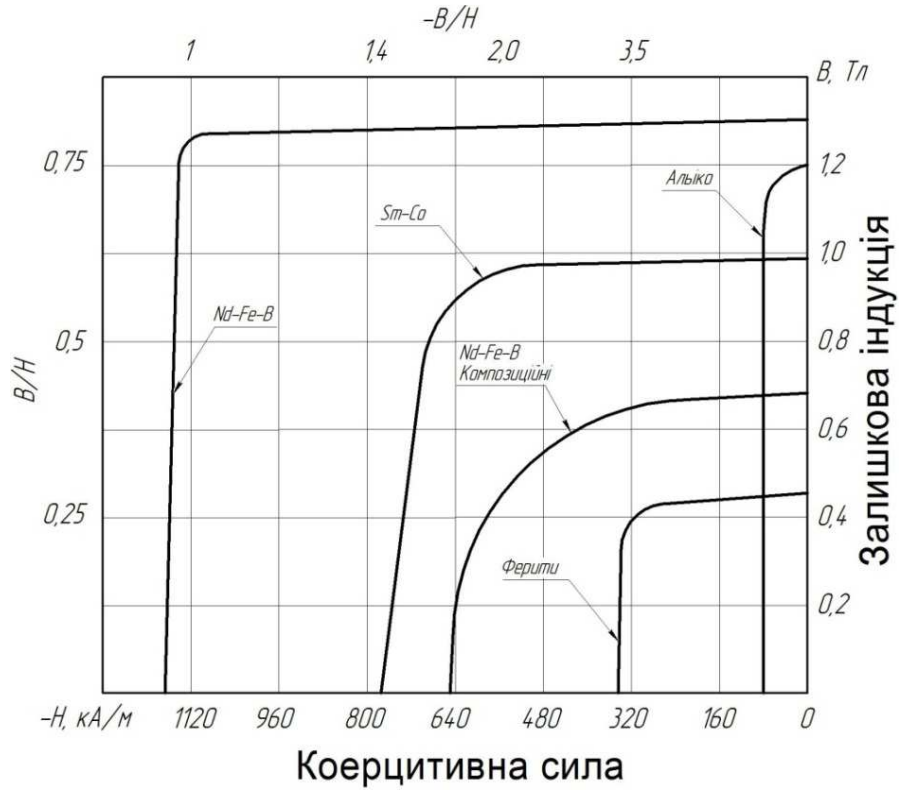


Рисунок 2 – Криві розмагнічування магнітотвердих матеріалів [4, 10]

Властивості постійних магнітів характеризуються кривою розмагнічування – ділянкою петлі гістерезису магніту, розміщеною у другому квадранті координат. Петля гістерезису (або крива $B-H$)описує залежність намагніченості від напруженості магнітного поля при циклічній зміні напруженості поля. Постійний магніт має певну робочу точку, яка може рухатися по кривій під впливом певних розмагнічуючих факторів, або ж залишатися фіксованою. Три найважливіші точки кривої $B-H$ – це точки, в яких вона перетинає осі B і H (визначають значення залишкової магнітної індукції B_r та коерцитивної сили за намагніченістю H_{cJ}) та точка, в якій добуток B і H максимальний.

На рисунку 2 зображено криві розмагнічування основних класів магнітотвердих матеріалів. В залежності від марки магніту вони можуть дещо відрізнятися, проте загалом характеризують клас матеріалу. В результаті аналізу кривих розмагнічування бачимо, що магніти на основі рідкоземельних металів мають значно вищі характеристики. Так, залишкова індукція цих магнітів у 2,5 рази перевищує залишкову індукцію магнітів на основі фериту барію, коерцитивна сила – у 6 разів. Це дає змогу досягти максимально можливої магнітної індукції на робочій поверхні системи, що наближається до індукції насичення магнітопроводів (2,13 Тл), виготовлених із магнітом'яких матеріалів. Серед рідкоземельних магнітів неодимові магніти володіють на 20-25% кращими магнітними характеристиками, ніж самарій-кобальтові.

Незважаючи на широкий вибір магнітотвердих матеріалів, жоден з них не задовольняє всіх вимог. Найбільш придатними є магніти із сплавів на основі рідкоземельних металів хімічного складу $Nd_2Fe_{14}B$. Вони володіють найкращими магнітними властивостями (найвище значення магнітної енергії серед усіх груп магнітів) та значно дешевші за магніти Sm-Co. Крім того, параметри матеріалів системи Nd-Fe-B ще не досягли теоретично встановленої межі, тому саме для них можна очікувати подальшого покращення властивостей.

Через широке різноманіття марок неодимових магнітів виникає питання вибору оптимальної з них для конкретних умов експлуатації магнітних ловильних пристроїв. Градація магнітів сплаву Nd-Fe-B здійснюється за максимальним енергетичним добутком $(BH)_{\max}$ та максимальною робочою температурою T_p .

Основні магнітні параметри магнітів в таблиці 3 наведено для нормальної температури 20 °С. Тому для оптимального використання магнітотвердих матеріалів потрібно звертати увагу на температурні коефіцієнти, які визначають зміну кривої розмагнічування при тепловому впливі на матеріал та температуру Кюрі T_c . Температурний коефіцієнт магнітної індукції α для неодимових магнітів змінюється в межах -(0,07–0,13) %/°С (при нагріванні на 100 °С залишкова магнітна індукція знижується від 7 до 13 %), а температурний коефіцієнт коерцитивної сили β становить -(0,55–0,65) %/°С. Магніти Nd-Fe-B мають низьку температуру точки Кюрі T_c (критична температура, при якій

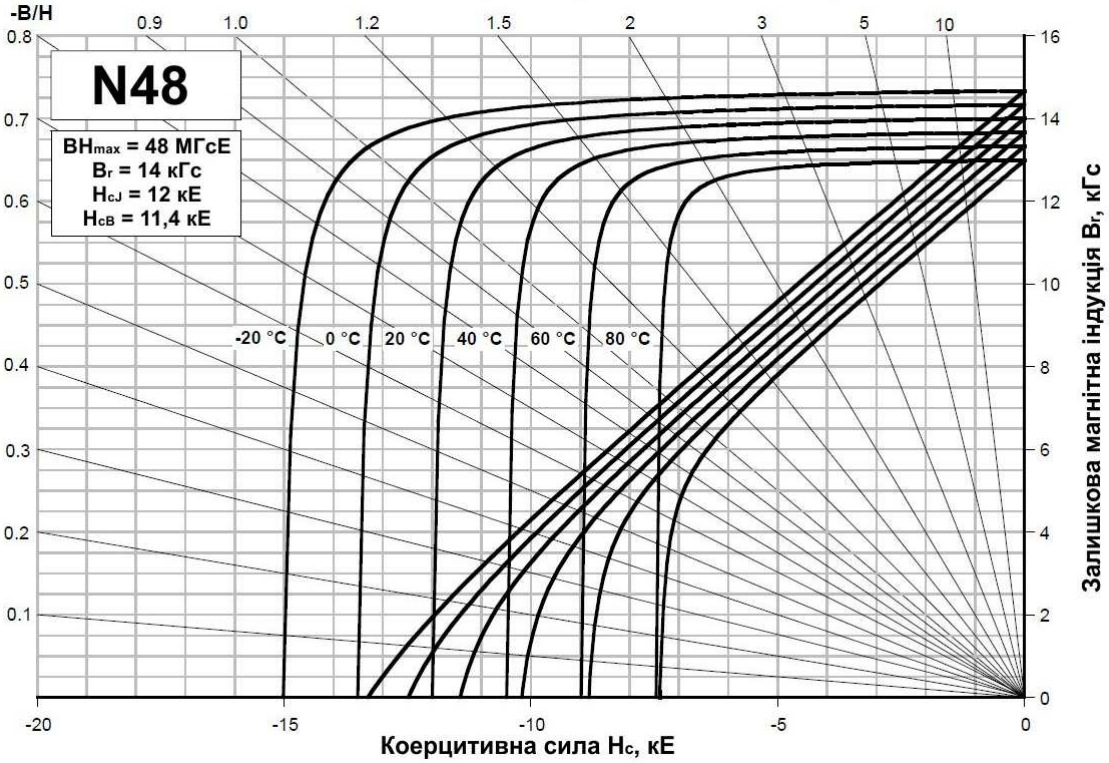


Рисунок 3 – Криві розмагнічування магніту марки N48 залежно від робочої температури [10]

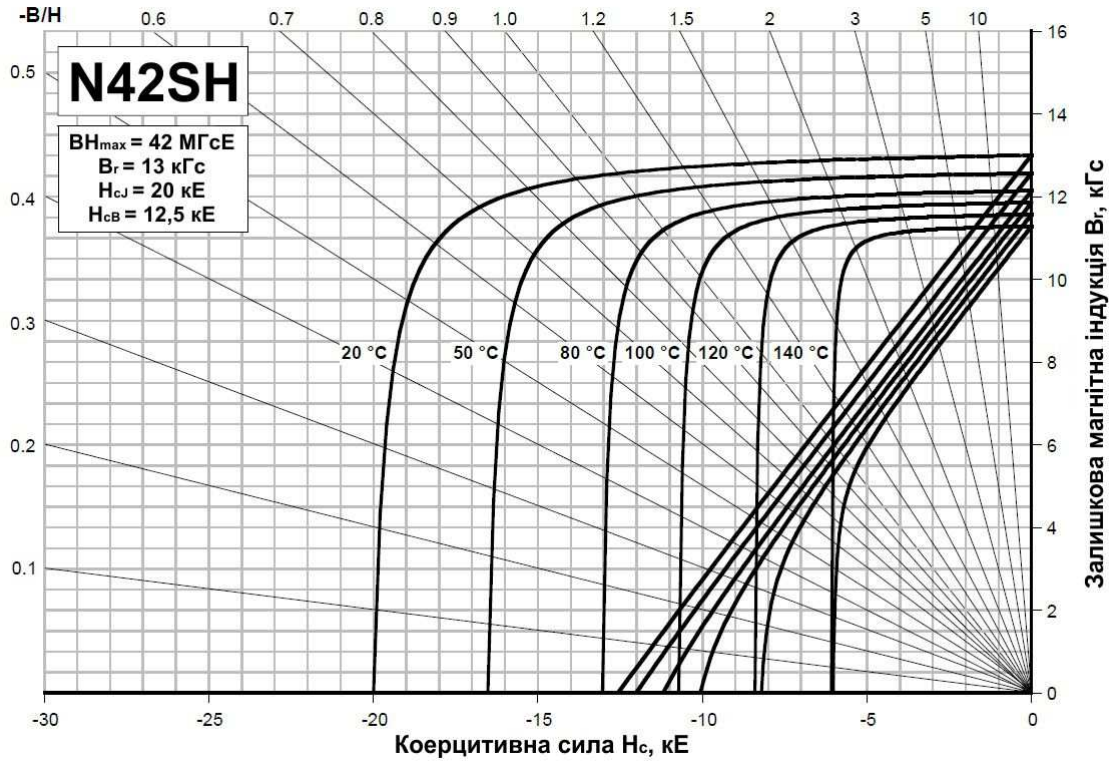


Рисунок 4 – Криві розмагнічування магніту марки N42SH залежно від робочої температури [10]

феромагнетик стає парамагнетиком) – приблизно 310 °С, проте її можливо підвищити. Температурні коефіцієнти виражають зворотні втрати властивостей постійних магнітів, які відновлюються, коли температура повертається до початкового значення. З перевищенням робочої температури магніту, коли робоча точка опускається нижче коліна кривої розмагнічування, виникають незворотні зміни, які проявляються в частковому або повному розмагнічуванні магніту. Ці втрати можна відновити лише перемагнічуванням постійного магніту.

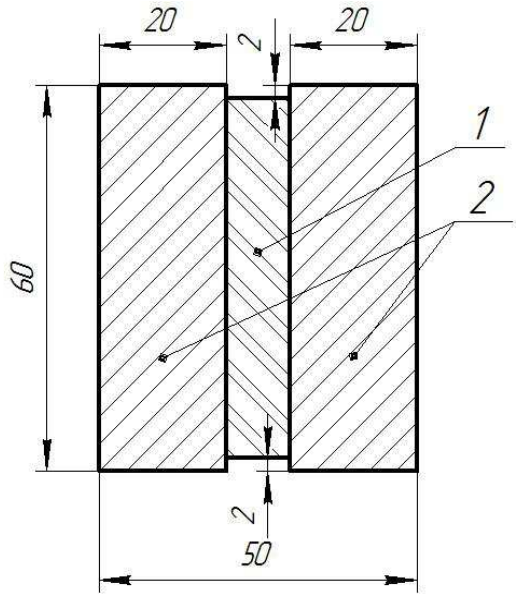
На рисунках 3 та 4 зображено криві розмагнічування неодимових постійних магнітів марок N48 та N42SH за різних температур. При нагріванні коерцитивна сила рідкоземельних

магнітотвердих матеріалів зменшується, що може призвести до незворотного розмагнічування магнітів. При охолодженні магнітів зростає як залишкова індукція, так і коерцитивна сила. Це пояснюється тим, що температурні коефіцієнти зміни залишкової індукції α та коерцитивної сили β завжди від'ємні, отже незворотні зміни магнітного поля виникнути не можуть.

Відомо, що температура на вибої свердловини відрізняється від температури на поверхні. Хоча наявність магнітопроводів дещо підвищує термостабільність магнітної системи, проте неодимові постійні магніти з робочою температурою 80 °С можна використовувати в ловильних пристроях тільки для неглибоких свердловин. Для глибоких свердловин необхідно використовувати постійні магніти з максимальною робочою температурою 150-200 °С. Досягти підвищення робочої температури можна шляхом легування диспрозієм, кобальтом, ніобієм, ванадієм і т.д. Покриття даними елементами покращує температурну і корозійну стабільність магнітів, проте різко збільшує їх вартість. Крім того, високотемпературні неодимові магніти володіють нижчими магнітними властивостями. Тому у системах магнітних ловильних пристроїв, що експлуатуються у свердловинах за температур вище 180 °С доцільно використовувати магніти сплаву самарій-кобальт.

Проведений аналіз дозволив встановити властивості магнітотвердих матеріалів без урахування їх роботи в магнітних системах. Тому для повної характеристики постійних магнітів потрібно враховувати вплив магнітопроводів – концентраторів магнітного потоку. Для цього проведемо розрахунок магнітного поля для елементарної магнітної системи, складеної із двох магнітопроводів товщиною 20 мм та постійного магніту товщиною 10 мм. Як матеріал постійного магніту в першому випадку використаємо ферит барію(марка 28БА190), в другому – неодим-залізо-бор (марка N42SH).Розрахунок магнітних полів систем будемо виконувати методом скінченних елементів, використовуючи пакет програми ELCUT 5.10 [12].

ELCUT дозволяє вирішувати задачі магнітостатики в лінійній та нелінійній постановках. Джерелом поля служить постійний магніт, намагніченість якого задається величиною коерцитивної сили. За граничні умови використаємо умову Діріхле. В даному випадку задаємо значення векторного магнітного потенціалу $A_0 = 0$ на зовнішній границі розрахункової області для вказання повного затухання магнітного поля. Геометрія дослідженої моделі системи наведена на рисунку 5. Всі вихідні дані для розрахунку зведені до таблиці 4.



1 – постійний магніт; 2 - магнітопровід

Рисунок 5 – Ескіз ділянки магнітної системи

Результати розрахунку магнітної індукції та картини магнітного поля для системи із феритовим магнітом наведені на рисунку 7, з неодимовим – на рисунку 8.Магнітні силові лінії, проходячи через магнітопроводи, створюють на робочій поверхні системи магнітне поле. Найбільша концентрація магнітного потоку спостерігається біля робочої поверхні системи. Значення магнітної індукції на робочій поверхні магнітної системи на основі рідкоземельних постійних магнітів марки N42SH значно перевищують аналогічні показники системи з феритовими магнітами 28БА190, хоча сам характер розподілу магнітної індукції залишається незмінним. Це пояснюється істотно вищими характеристиками рідкоземельних магнітів.

Таблиця 4 – Вихідні дані для розрахунку магнітної системи

Параметр задачі	Значення параметра	
	Варіант 1	Варіант 2
Тип задачі	Нелінійна задача магнітостатики	
Геометрія моделі	Рисунок 5	
Тип і марка постійних магнітів	Ферито-барієві, 28БА190	Рідкоземельні, N42SH
Відносна магнітна проникність μ – повітря – сталі	1 2000	
Крива розмагнічування постійного магніту	Рисунок 6	Рисунок 4
Граничні умови	Умова Діріхле	

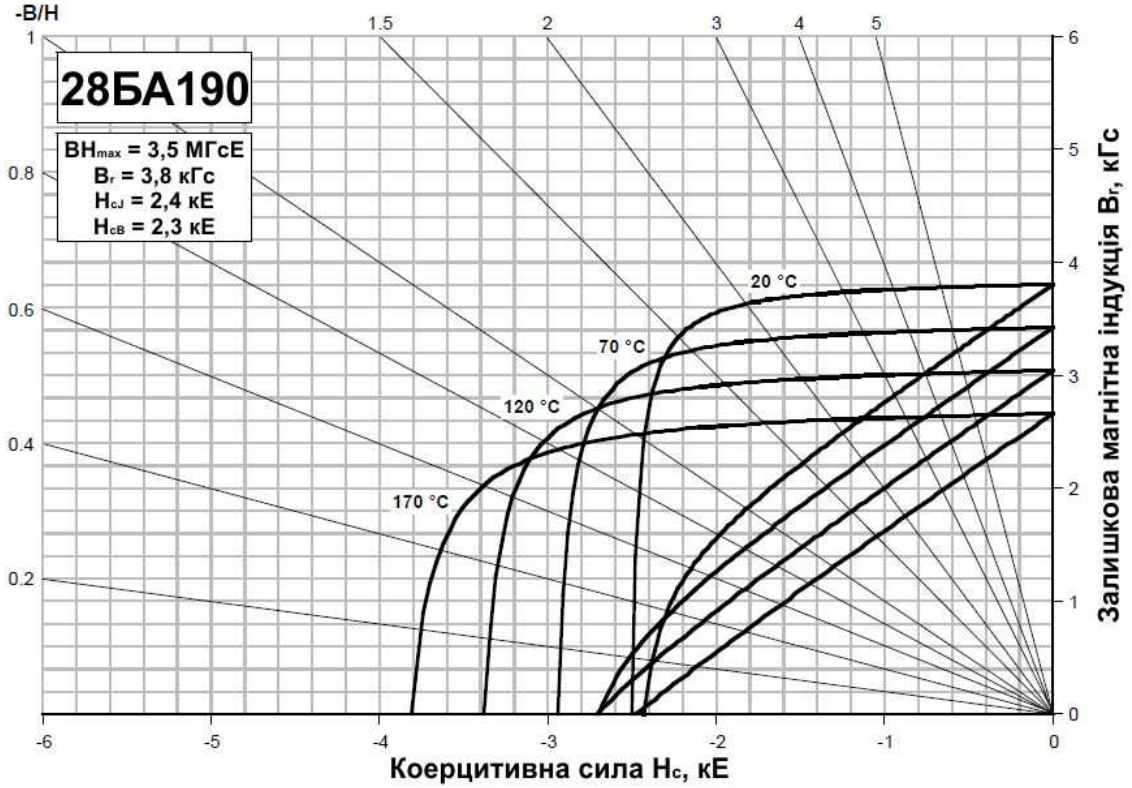


Рисунок 6 – Криві розмагнічування магніту марки 28БА190 залежно від робочої температури [10]

Отримані дані з певними припущеннями можна перенести на реальні магнітні системи, що використовуються в ловильних пристроях.

Таким чином, за результатами проведених досліджень можна сформулювати такі висновки:

- на основі аналізу умов роботи магнітних ловильних пристроїв встановлено вимоги до конструкції їх систем та критерії вибору матеріалу постійних магнітів;
- проаналізовано властивості сучасних магнітотвердих матеріалів та визначено область їх раціонального застосування в ловильних пристроях;
- обґрунтована доцільність використання в системах ловильних пристроїв рідкоземельних магнітів сплаву неодим-залізо-бор;
- розроблено рекомендації щодо вибору марки неодимових магнітів в системах ловильних пристроїв у залежності від температури на вибої;
- результати розрахунку магнітного поля в програмі двовимірного моделювання ELCUT показують, що системи на основі рідкоземельних постійних магнітів за магнітною індукцією у 3-4 рази перевищують системи на базі феритових магнітів.

Подальші дослідження будуть проводитися для з'ясування раціональних геометричних співвідношень елементів магнітних систем ловильних пристроїв при використанні неодимових рідкоземельних магнітів.

Література

1 Акопов Э. А. Очистка забоев глубоких скважин / Э. А. Акопов. – М.: Недра, 1970. – 120 с.

2 Пустовойтенко И. П. Предупреждение и ликвидация аварий в бурении / И. П. Пустовойтенко; 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1988. – 279 с.

3 Магнитные устройства для очистки скважин / Ю. А. Курников, И. Ф. Концур, М. Т. Кобылянский, Л. И. Романишин; под. ред. Ю. А. Курникова. – Львов: Вища школа, 1988. – 108 с.

4 Куневич А. В. Ферриты: энциклопедический справочник: в 5 т. Т. 1.: Магниты и магнитные системы. / А. В. Куневич, А. В. Подольский, И. И. Сидоров. – СПб.: Информационно-издательское агенство «ЛИК», 2004. – 358 с.

5 Материалы магнитотвердые литые. Марки: ГОСТ 17809-72. – [Введ. 1974-01-01]. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2001. – 8 с. – (Межгосударственный стандарт).

6 Гасанов А. П. Восстановление аварийных скважин:справочник / А. П. Гасанов. – М.: Недра, 1983. – 128 с.

7 National Oilwell VARCO. BOWEN Fishing Magnets [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.nov.com/Downhole/Fishing_Tools/Junk_Catch_Fishing_Tools/Fishing_Magnets.aspx

8 Константинов О. Я. Магнитная технологическая оснастка / О. Я. Константинов. – Л.: Машиностроение, 1974. – 384 с.

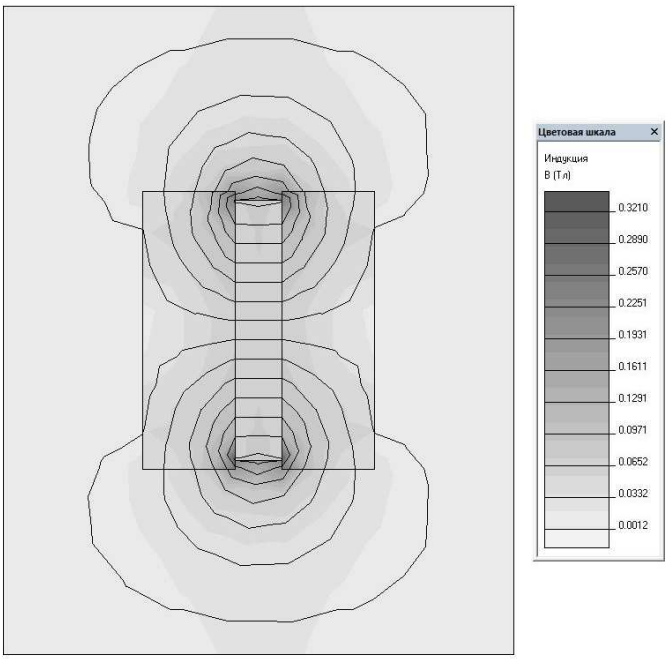


Рисунок 7 – Розподіл магнітної індукції системи з феритовим постійним магнітом

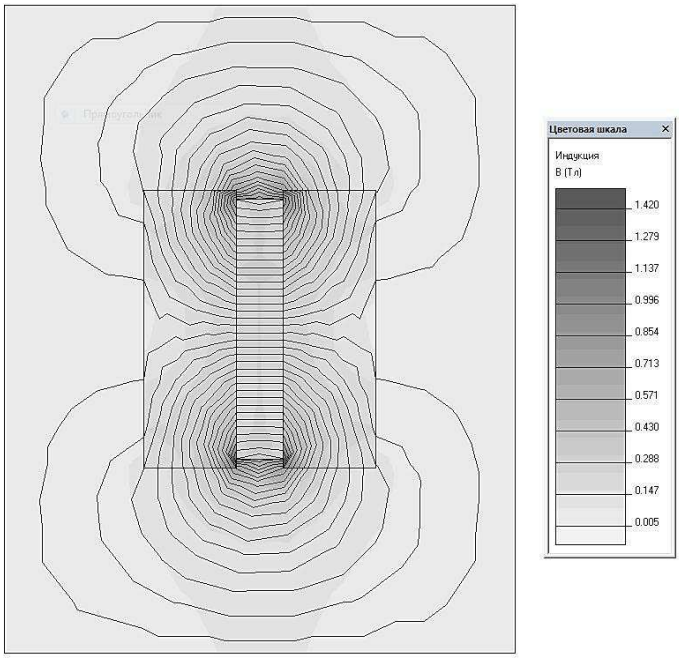


Рисунок 8 – Розподіл магнітної індукції системи з рідкоземельним постійним магнітом

9 Ферриты магнитотвердые. Марки и основные параметры: ГОСТ 24063-80. – [Введ. 1981-07-01]. – М.: Издательство стандартов, 1985. – 15 с. – (Государственный стандарт).

10 DEXTER Magnetic Technologies. Material Grades. Neodymium Iron Boron Magnets [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.dextermag.com/material-grades/neodymium-iron-boron-magnets

11 А. с. 1328478 СССР, МКИЕ 21 В 31/06.Магнитный ловитель / Л. В. Евчук, П. В. Тарабаринов, Т. И. Сабан, Л. И. Романишин. – № 4045020/22-03; заявл. 03.03.86; опубл. 07.08.87, Бюл. № 29.

12 ELCUT. Моделирование двумерных полей методом конечных элементов: руководство пользователя [Электронный ресурс]. – Санкт-Петербург: Производительный кооператив ТОР, 2010. – Режим доступа: http://elcut.ru/demo/manual.pdf

Стаття надійшла до редакційної колегії 28.01.13
Рекомендована до друку професором ***Івасівим В.М.*** *(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ) професором* ***Горкуновим Б.М.*** *(НТУ "Харківський політехнічний інститут», м. Харків)*

УДК 622.245

ПОЛІМЕРНО-КОМПОЗИЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ ДЛЯ ЕЛЕМЕНТІВ БУРИЛЬНОЇ КОЛОНИ

М.Є. Чернова

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 48090,
e-mail: physics@nung.edu.ua

Суттєвою проблемою нафтогазової промисловості є втомно-корозійне руйнування елементів бурильної колони та прихоплення бурильних, обважнених труб в свердловині, які виникають у процесі буріння похило-скерованих і горизонтальних свердловин. Причиною прихоплення є тертя, що виникає між стінками стовбура свердловини та елементами бурильної колони. Явище тертя перешкоджає забезпеченню цілісності керна у керноприймальному пристрої.

Розглядається можливість подолання цих проблем за рахунок застосування полімерно-композиційних матеріалів для обробляння поверхонь, що зазнають негативних наслідків процесу тертя та корозійно-втомного руйнування. Підбір матеріалів для обробляння поверхонь елементів бурильної колони та внутрішньої поверхні керноприймального пристрою залежить від техніко-механічних показників, які можуть задовольняти вибрані матеріали, та від способу їх нанесення, оскільки промислові потреби вимагають мобільного устаткування для проведення технологічного процесу полімерного покриття безпосередньо на промислах.

Наведено огляд відомих методів, технологій, технічних засобів полімерного покриття металевих поверхонь та запропоновано використання математичної моделі для визначення міцнісних характеристик того полімерного покриття, яке може застосовуватися для певних умов експлуатації.

Ключові слова: полімерне покриття, зносостійкість, прихоплення, тертя.

Существенными проблемами нефтегазовой промышленности являются коррозионно-усталостное разрушение элементов бурильной колонны, прихваты бурильных и утяжеленных бурильных труб, происходящие при бурении наклонно-направленных и горизонтальных скважин. Прихваты возникают из-за трения между стенками ствола скважины и элементами бурильной колонны. Трение препятствует обеспечению целостности керна в керноприемнике.

Рассматривается возможность устранения этих проблем за счет использования полимерно-композиционных материалом для обработки поверхностей, находящихся под воздействием процесса трения и коррозионно-усталостного разрушения. Выбор материалов для обработки поверхности элементов бурильной колонны и внутренней поверхности керноприемника зависит от технико-механических показателей, которым могут удовлетворять выбранные материалы, и от способа их нанесения, так как существует необходимость в мобильных установках для проведения технологического процесса полимерного покрытия непосредственно на промыслах.

Дан обзор известных методов, технологий, технических способов полимерного покрытия металлических поверхностей, предложено использование математического моделирования для определения прочностных характеристик того полимерного покрытия, которое может быть использовано для определенных условий эксплуатации.

Ключевые слова: полимерное покрытие, износостойкость, прихват, трение.

Significant problems in the oil and gas industry are corrosion-fatigue failure of drill string components, stuck drill pipe and drill collar, occurring during the drilling of directional and horizontal wells. Sticking arise from friction between the walls of the wellbore and the elements of the drill string. The friction prevents Integrity core in core receiver. The opportunity to address these problems through the use of polymer-composite material for the treatment of surfaces under the influence of friction and corrosion-fatigue failure. The choice of materials for surface elements drill string and the inner surface of core receiver depends on the technical and mechanical properties, which can satisfy the selected materials and the method of their application, as needs require commercial mobile units for the process of the polymer coating directly on the fisheries. This paper surveys the problems of known methods, technologies, technical methods regarding the polymer coating of metal surfaces, proposed the use of mathematical modeling to determine the strength properties of the polymer coating, which can be used for certain conditions.

Keywords: plastic coating, wear resistance, sticking, friction.

Дослідженню причини, через які виникають прихоплення бурильних колон та відбувається їх втомно-корозійне руйнування, присвячено багато наукових праць, але не зважаючи на це, вони все одно продовжують виникати, що вимагає матеріальних затрат і часу на їх ліквідацію.

В минулому столітті для захисту від корозії металу успішно застосовувалося покриття поверхні (напиленням або гальванічне) іншими металами, зокрема цинком, міддю, хромом, нікелем.

З розвитком науки у нове століття прийшли нові технології. Так, на даний час успішно розвиваються технології покриття поверхонь на основі полімерних, лакофарбових, каучукових матеріалів та композицій на їх основі, які знаходять широке застосування в машинобудуванні, в техніці, в промисловості.

Аналіз наукових праць довів, що межі застосування полімерного покриття інтенсивно розширюються. Це зумовлено тими перевагами, які отримують металеві конструкції, захищені полімерним покриттям: низька адгезія до різних матеріалів, низька фрикційність, висока стійкість до хімічної агресії та ін.

Полімерне покриття дає можливість використовувати низькосортні марки сталі для виготовлення обладнання, що працює в агресивному середовищі, що, в свою чергу, призводить до підвищення терміну використання такого обладнання, а в цілому і до значної економії коштів.

В США з початку 90-х років основна кількість бурильних труб, що використовуються під час будівництва свердловин, мають полімерне покриття. В Україні такий напрям робіт практично відсутній, а досвід застосування полімерного покриття для труб магістральних нафтогазопроводів не може бути застосованим до бурильних труб, оскільки умови їх експлуатації є зовсім іншими.

Недостатнього поширення набули методи поверхневого зміцнення поверхонь, що за правильно вибраних режимів технологічного процесу дозволяють підвищити межу витривалості у 1,5-2 рази при одночасному підвищенні зносостійкості. До них відносяться як традиційні (хіміко-термічна обробка, поверхнево-пластична деформація за рахунок способу тренування), так і нові (плазмове напилення, лазерна обробка, іонна імплантація) методи.

На сучасному етапі розвитку науки і наукових технологій широкого застосування набуває полімерне покриття, яке стає бар'єром, що обмежує доступ агресивних середовищ до поверхонь, які ним захищаються.

Ще у 80-х роках в Татарстані на базі нафтовидобувних підприємств функціонували цехи зі створення емалевого покриття для насосно-компресорних труб. Але ця технологія на той час не відповідала технічним, економічним та екологічним вимогам.

Досліджуючи способи боротьби з прихопленнями під час буріння свердловин, було встановлено, що для запобігання прихоплень бурильних колон використовуються такі засоби, як додавання в промивальну рідину різноманітних змащувальних добавок, конструювання в компоновці бурильної колони пристроїв гідроімпульсної та ударної дії, нанесення спеціального покриття на зовнішню поверхню бурильних труб та використання захисних пристроїв, що встановлюються на колоні бурильних труб навпроти прихопле-небезпечного інтервалу в свердловині. Стосовно останнього способу відомо багато пристроїв як вітчизняних, так і зарубіжних авторів.

У часи бурхливого розвитку нафтогазової промисловості в колишньому СРСР щорічно понад 200 тис замків бурильних труб вилучалася з експлуатації через їх зношеність внаслідок тертя зі стінками стовбура свердловини.

Надзвичайно актуальним питанням є зменшення сил тертя між елементами компоновки низу бурильної колони та стовбуром свердловини при бурінні похило-скерованих і горизонтальних свердловин із застосуванням гвинтових вибійних двигунів. Наявність значних сил тертя перешкоджає доведенню ефективного осьового навантаження на породоруйнівний інструмент, що призводить до зменшення механічної швидкості буріння, збільшення тривалості часу буріння.

Отже, актуальність застосування полімерного покриття поверхні елементів бурильної колони з метою запобігання її прихоплень, підвищення зносостійкості замків бурильних труб під час будівництва нафтогазових свердловин не викликає сумніву.

На основі аналізу літературних і патентних джерел встановлено, що основними напрямками проведення досліджень є:

- технологія полімерного покриття для труб нафтового сортаменту;
- матеріали та складові, для отримання полімерних покриттів;
- технологія та техніка отримання полімерного покриття.

Аналіз існуючих технологій і технік для нанесення зовнішнього покриття труб свідчить, що сучасні тенденції розвитку даної області значною мірою визначаються розробкою нових матеріалів, які можуть забезпечити високу якість покриття. Не залишені без уваги на сьогоднішній день традиційні види матеріалів, зокрема порошки, удосконалення складу яких базується на створенні гібридних сумішей і наповнених композицій. Відповідно, розвиваються технології порошкового покриття поверхонь.

Серед великої кількості полімерних матеріалів, що використовуються в якості захисного покриття, унікальними властивостями володіють фторопласти, що поєднують в собі високу хімічну стійкість до різноманітних агрегатних середовищ, високі діелектричні та антифрикційні властивості.

В роботах [1, 2, 3, 4] наведено результати експериментальних досліджень, на основі яких розроблено спосіб приготування полімерного фторопласт-вмісних матеріалів. Наведено технологічні рекомендації з нанесення полімерних покриттів способом авто- і електрофорезу на металеві поверхні, такі як сталь, алюміній і їх сплави.

Розробка і застосування ПМК дасть можливість забезпечити низький коефіцієнт тертя, високу роботоздатність, зносостійкість, самозмащування, стійкість до розшарування полімерного покриття в процесі експлуатації в свердловині, вібро- і ударостійкість, термостійкість і хімічну стійкість до агресивних середовищ.

Дослідження, що проводились протягом останніх років у Тихоокеанському університеті, довели перспективність застосування епоксидофторопластових матеріалів для широкого напрямку не лише триботехнічних виробів, зокрема підшипників, ущільнювальних систем [7], але й для покриття металевих поверхонь для різноманітних умов експлуатації. Розроблені

ними матеріали є високотехнологічними, володіють високою зносостійкістю, самозмащуванням, достатньо низьким коефіцієнтом тертя. До складу цих матеріалів входять: епоксидна смола, фторопласт-4, тверді мастила, армуючі компоненти, металеві порошки ЕФЛОНГ, ЕФ, ЛАСТ, ФЕЛОН. Специфічна технологія для виробництва епоксидофторопластових виробів вимагає спеціального обладнання, верстатів, інструментів, пристроїв, нових технологічних прийомів, дослідження нових зносостійких ПМК в різноманітних умовах експлуатації, постійного вдосконалення модифікації і складу ПМК. Результати цих досліджень дають можливість врахувати вибір компонентного складу під час розробки покриття для елементів бурильної колони, яке б задовольняло фізико-міцністним характеристикам для специфічних умов експлуатації.

Дослідження показали, що сучасні модифікації епоксидофторопластових матеріалів містять в якості матриці епоксидні смоли, а як наповнювачі і антифрикційні матеріали – дрібнодисперсні фторопласти, графіт, дисульфід молібдену, металеві порошки бронзи, свинцю, скло, вуглеграфітові високомодульні волокна тощо, що забезпечує їм необхідні фізико-механічні властивості під час роботи без мастил і у водяних середовищах. Застосування мікроструктурного аналізу дає можливість оцінити дисперсність фторопластових і волокнистих наповнювачів, які визначають ступінь гомогенності внутрішньої структури отримуваних антифрикційних матеріалів. Діапазон температур, в яких можуть експлуатуватися епоксидофторопластові матеріали, лежить у межах від мінус 60° С до плюс 120° С, а зовнішні навантаження, які вони витримують, становлять до 100 МПа.

Важливими є дослідження адгезійної міцності епоксидофторопластів та інших фторопластових композицій на відрив та зсув, що дозволить отримати кількісні характеристики для використання їх на практиці.

Комплексно проведені дослідження показали [5, 6], що найбільш придатним для вирішення поставленої проблеми є використання дисперснонаповнених ПКМ і металополімерних матеріалів із додаванням політетрафторетилену (ПТФЕ). Використання ПТФЕ, в якості полімерної матриці таких матеріалів, зумовлено унікальними властивостями: аномально низьким коефіцієнтом тертя (0,04÷0,05 по сталі без мастила), високою термостійкістю (температура початку розкладання 688 К), високою хімічною стійкістю (реагує тільки з розплавом лужних металів, трифтористим хлором і елементарним фтором за високих температур), ізоляційними властивостями, однак ПТФЕ має низьку зносостійкість в трибоспряженнях (зношуваність ПТФЕ в процесі тертя в 4÷5 разів вища, ніж капролону, поліаміду, поліетилену і наповнених матеріалів на їх основі).

Модифіковані антифрикційні ПКМ на основі армованих фторопластових матеріалів (ЛАФМ), які є комбінованим металополімерним композитом з макрогетерогенною структурою, що складається з перемежованих ділянок міцного зносостійкого шару армуючої сітки і полімеру, здатні утворювати в процесі тертя проміжний шар мастила впродовж всього часу експлуатації. Встановлено, що тільки у випадку нагріву ЛАФМ в обмеженому просторі до температури плавлення ПТФЕ відбувається утворення монолітної структури полімеру, яке зумовлене коезійними і дифузійними процесами, а в процесі остигання спостерігається механічне закріплення полімерного шару в пористому просторі сітки. Модифікація поверхні на ущільнюючих виробах з ПТФЕ шляхом полімер-полімерного покриття, нанесеного з розчинів гетерополіаріленів, дозволяє зберегти еластичність і деформаційно-міцнісні властивості основного матеріалу, що водночас підвищує зносостійкість до 80 і твердість до 2 разів. У процесі тертя фторопластових композицій з порошками свинцю (розміри часток не менше 20 мкм) або з діоксином свинцю в зоні фрикційного контакту формується плівка перенесення, що містить фазу фториду свинцю з кубічною флюоритовою структурою, яка дає додаткове суттєве підвищення мастильних властивостей в зоні тертя завдяки наявності площин ковзання в кристалічній структурі. В процесі тертя у взаємодію з контактуючою поверхнею вступають не окремі макромолекули і утворення типу «стрічка», а надмолекулярні утворення – сфероліти, що перешкоджають процесу деформації, який супроводжує тертя і зношення матеріалу.

Розв'язок проблеми з отримання більш досконалих матеріалів іде двома шляхами, які взаємопов'язані між собою – експериментальним відпрацюванням і теоретичними дослідженнями. Теоретичні дослідження, в свою чергу, мають також два підходи. Перший з них відштовхується від вже існуючого досвіду напрацювання стосовно нових ПКМ, коли намагаються керувати вихідними характеристиками шляхом інтерполяції залежностей вихідних характеристик ПКМ від параметрів на виході. Цей підхід називають експериментально-статистичним або кібернетичним, маючи на увазі підхід до ПКМ як до свого роду «чорної скриньки». Другий підхід має декілька назв, а саме – структурний, багаторівневий, мультимасштабний і таке ін. Матеріал розглядається як складна конструкція, в якій окремі фази чи елементи структури відіграють роль підконструкцій. За такої умови проводиться пряме моделювання поведінки матеріалу під навантаженням з урахуванням внутрішньої геометрії елемента об'єму, властивостей і характеру взаємодії фаз матеріалу (елементів його структури). Це робиться з врахуванням механіки суцільних середовищ із застосуванням різноманітних числових методів, а також інколи з використанням дискретних методів. В роботах [8] розглядаються шляхи пошуку формування оптимальних і раціональних деформаційно-міцнісних властивостей композиційних матеріалів.

На теперішній час визначенню механічних властивостей ПКМ (і взагалі структурно-

неоднорідним середовищам) присвячено багато робіт. Структурний підхід орієнтується на розгляд структури матеріалу і встановлення зв'язку між властивостями додатків (включень), матриці і способами їх взаємодії з ефективними характеристиками матеріалу. В роботі [8] вказано, що «структурну механіку можна розглядати і як теоретичну базу для побудови континуальних (феноменологічних) механічних моделей, які застосовують в конструкторській діяльності».

У процесі визначення механічних властивостей ПКМ широкого застосування набув такий підхід, за якого матеріал замінюють однорідним середовищем з певними ефективними характеристиками. За такої умови ефективні характеристики цього середовища відшукують з аналізу елемента структури або елемента об'єму, що повинні відображати деякі характерні особливості матеріалу. Усереднення проводиться з врахуванням рівних енергій деформації, які обчислюються з моделей однорідного і неоднорідного середовищ із застосуванням розрахунків за методом кінцевих різниць, кінцевих елементів, граничних інтегральних рівнянь тощо. Спільною проблемою для пропонованих моделей є вибір елемента структури, яким замінюється структурно-неоднорідне середовище. Широкого застосування набула модель, що складається з матриці і одного включення (одного компонента). Форма цього включення може бути довільною: сферичною, еліпсоїдальною і навіть у вигляді квадрату (в плоскому випадку). Аналітичні розв'язки цих моделей наводяться в джерелі [9].

Для аналізу деформаційно-міцнісних характеристик дисперсно наповнених ПКМ застосовують моделі, які враховують систематичне або випадкове розміщення часток за умови ідеального контактування між матрицею і включенням. Отримані розв'язки дають можливість зробити оцінку ефективних (середніх за об'ємом) пружних або в'язкопружних характеристик матеріалу.

В.А. Кочетков [10] пропонує методом ефективних середовищ робити розрахунки механічних характеристик композиції, наповненої складовими або порожнинними сферичними включеннями (додатками), разом з тим, І.Н. Фролова і А.В. Мотавкін [11] пропонують проводити аналіз механічних властивостей композиційних матеріалів із застосуванням змішаного підходу Фойгта і Рейса. Ця модель враховує в'язкопружні властивості матриці, порушення умов ідеального контакту на межі поділу фаз, а також випадковий розподіл включень. Г.Н. Кувиркін і А.В. Єфименко [12] пропонують використовувати теорію суміші, яка «оперує середніми за компонентами композиту величинами: напруженнями, переміщеннями і деформаціями». Автори вважають, що застосування цієї теорії дає можливість враховувати ефекти, яких не зауважує теорія ефективних модулів.

У процесі дослідження структурно-неоднорідного середовища варто застосовувати моделі самоузгодження. У цих моделях, під час розрахунків виділяється лише одна структурна неоднорідність, а решта замінюються деяким збуренням. Це збурення може бути описане як середовище з ефективними характеристиками, в яке занурене включення, або у вигляді поля, що вводиться в точках матриці матеріалу. А.А. Паньков [12] використовує узагальнений метод самоузгодженя. Цей метод передбачає зведення задачі прогнозування ефективних деформаційно-міцнісних властивостей композитних матеріалів з «випадковими структурами до розв'язку простіших задач про включення з перехідним шаром в середовищі з шуканими ефективними пружними властивостями». В [12] прогнозуються ефективні пружні властивості сферопластиків узагальненим методом самоузгодження.

Серед дискретних методів широке застосування отримав метод молекулярної динаміки, за якого матеріал розглядається як система твердих кульок. Взаємодія між елементами визначає механічні властивості середовища. Цей метод широко використовується в моделюванні покриття, яке містить порошки металів. Переваги дискретного методу в порівнянні з методами механіки суцільних середовищ проявляються у можливості більш простого опису процесів руйнування. При цьому зникають питання стосовно введення ефективної величини відносного об'єму пошкоджень.

Б.Є. Победря в межах підходів механіки суцільних середовищ проаналізував особливості моделювання композитів і зауважив, що моделювання нанесених на металеву поверхню композитних матеріалів слід проводити з врахуванням нестабільності їх фізико-механічних властивостей. Для цього «інколи варто застосовувати закони статистичної фізики, коли за статистичними характеристиками матеріальних властивостей визначаються статистичні характеристики шуканих величин», а інколи варто вводити приведене середовище з «ефективними визначеними співвідношеннями», які визначаються теоретично або з експерименту. Наголошується також на появі нового підходу у моделюванні композитних матеріалів в межах механіки деформованого твердого тіла – «гомогенізації», коли «обчислюються визначальні величини наведеного середовища і дається енергетична оцінка заміни розв'язків краєвої задачі з вихідними визначальними співвідношеннями на розв'язки краєвої задачі з визначальними співвідношеннями наведеного середовища». Але такий підхід має певні недоліки, так, наприклад, неможливо обчислити мікронапруження в композиті, адже міцність визначається сукупністю параметрів напружено-деформованого стану в точці, а наявність внутрішніх меж призводить до суттєвої осциляції параметрів всередині матеріалу, навіть за рівномірного розподілу зовнішніх навантажень.

П.М. Огибалов, В.А. Ломакін і Б.П. Кішкін виділяють два шляхи в дослідженні деформівно-міцнісних властивостей нанесених на поверхню композиційних матеріалів (НКМ). Пер-

ший з них полягає у розгляді матеріалу як конструкції зі своєю внутрішньою структурою. За цієї умови «завдання полягає у віднайдені залежностей між середніми характеристиками напружень і деформацій а також умов міцності композиційного матеріалу в залежності від властивостей додатків, які зв'язують, армують та від зв'язку між компонентами на межі їх поділу». Другий шлях дослідження деформівно-міцнісних властивостей наповнених композитів полягає у розгляданні їх як квазіоднорідних середовищ і використанні при цьому традиційних для механіки засобів, оскільки більшість наповнених композитів є макроскопічно ізотропними, тому їх поведінка може описуватися ізотропними лінійною і нелінійною теоріями пружності і в'язкопружності.

Відомо, що сили прихоплення залежать від сукупності сил, зумовлених перепадом тиску промивальної рідини і липкістю кірки поверхні стовбура свердловини, та коефіцієнта тертя. Оскільки сила, що зумовлена перепадом тиску, переважно не піддається регулюванню, бо густина і характеристики бурового розчину зумовлені геолого-технологічними умовами, тому є необхідним максимально зменшити коефіцієнт тертя в процесі взаємодії між стовбуром свердловини і поверхнею бурильних труб. Для цього можуть бути використані полімерні покриття елементів бурильної колони.

Як було наведено вище, полімерні покриття володіють низьким коефіцієнтом тертя, але існує проблема їх стирання з поверхні в процесі притискання бурильної колони до гірської породи, яка утворює стінки свердловини. Отже, існує проблема прогнозування зношуваності цих покриттів за заданих параметрів буріння та з визначення оптимальної товщини покриття для забезпечення позитивного результату під час будівництва свердловини. З урахуванням глибини свердловини та проходки на долото, які визначають шлях тертя бурильної колони , слід визначити силу її притискання до стінок свердловини, та емпірично визначити зносостійкість полімеру.

Під час переміщення бурильної колони в свердловині тертя має дві складові механічну і молекулярну. Механічна складова зумовлена механічною взаємодією шорстких шарів поверхонь контактуючих матеріалів, товщина яких значно перевищує молекулярні шари. Йдеться про значну шорсткість поверхонь, що труться, і які взаємодіють своїми нерівностями. У процесі механічного тертя за взаємодії тіл що труться, втягуються віддалені від поверхні шари. Це зумовлено тим, що зі збільшенням інтенсивності викривлення стовбура свердловини і ваги нижньої ділянки труб, більше навантаження прикладається до труб і свердловини, відповідно більшим є зчеплення шорсткої поверхні труб із шорскими стінками свердловини. Полімерне покриття володіє, порівняно з поверхнею труб, гладкою поверхнею, тому ця складова тертя зменшується.

Без врахування сил, що зростають з часом і залежать від щільності стінок стовбура свердловини та адгезійних сил, значна частка сумарних зусиль, які потрібні для подолання опору рухові породоруйнівного інструменту припадає на руйнування породи долотом та здирання стінок свердловини замками бурильної колони. Окрім того, через утворення нерухомої маси бурового розчину під час простою, також є необхідним прикладання певного зусилля для зрушення її навколо труб і долота. Під час взаємодії пристінкового шару свердловини з елементами КНБК існує їх зчеплення. Шорсткості поверхні труби і замків в процесі руху сприяють кольматовані стінки свердловини, чим спричинюють підвищення опору переміщення.

Окрім механічної складової тертя, зумовленої шорсткістю труб, відбувається фізико-хімічна взаємодія труби з частинками твердої фази кірки на рівні молекулярних шарів між атомами і молекулами контактуючих тіл, тобто виникає молекулярне тертя. Через взаємне притягання атомів і молекул тіл, що дотикаються, або що наблизились на дуже малі відстані, виникають сили взаємодії між тілами. Встановлено, що сила такої взаємодії є обернено пропорційною шостій степені віддалі між поверхнями тіл (за Б.В.Дерягіним), до того ж сила взаємодії зі збільшенням відстані між поверхнями спочатку є від'ємною і має адгезійний характер, спричинюючи тим самим злипання поверхонь, а потім стає додатною, тобто розклинюючою. Теорія тертя, з врахуванням взаємодії тіл на атомно-молекулярному рівні і явища притискання та адгезії, описує сумарну силу рівнянням:

$$F = \mu(N + AS), \qquad (1)$$

де μ - коефіцієнт тертя;

S - площа істинного контакту, м^2;

A - питома адгезія, що діє на одиниці площі істинного контакту (Н/м^2);

N - сила притискання, Н.

Стосовно першої складової в рівнянні (1), можна сказати, що для подолання взаємовідштовхування двох тіл і введення їх у контакт є необхідним прикладання певної сили N, і вона буде тим більшою, чим більшою є одиниця адгезійної площі істинного контакту між тілами, тобто більшим буде зусилля, необхідне для руху.

Під час руху інструменту величина сили N визначається притискаючим зусиллям, що діє по нормалі до площі контакту труби і стінки свердловини. Навіть за відсутності перепаду тиску для зрушення тіла чи труби в кірці слід подолати адгезійні зв'язки в місцях істинного контакту, що утворився через тиск труби на кірку, що виникає під дією її власної ваги. На практиці спостерігається одночасно як адгезія, так і розклинювання тіл, зумовлене взаємодією електронних оболонок атомів, що виникає в процесі їх взаємного перекриття, або так звана молекулярна шорсткість. Через таку взаємодію виникають сили, рівнодійна яких спрямована за нормаллю до поверхонь поділу, тобто сили адгезії і сили, спрямованої тангенціально до цих поверхонь – сили тертя. Оскільки радіус дії сил

притягання є співрозмірним з розмірами атомів, а радіус дії сил відштовхування є значно більшим, через наявність шорсткості поверхонь тіла неможливо наблизити так, щоб переважали сили відштовхування, тому результуючою силою їх взаємодії є адгезій на сила.

Зрушення і рух труби в промивальному розчині може відбуватися як з руйнуванням зв'язків по поверхні контакту «метал-кірка», так і всередині кірки. Тобто, в залежності від сили адгезійних зв'язків між частинками кірки і металу труби може мати місце як зовнішнє, так і внутрішнє тертя.

Для визначення притискуючих зусиль бурильної колони до стінок свердловини розглянемо процес контактування бурильної колони зі стінками свердловини під час спуско-підіймальних операцій.

У вертикальній свердловині чи за її нахилу вільно підвішені обважнені бурильні труби (ОБТ) і турбобур не можуть мати значної площі і зусиль контакту зі стінками свердловини, оскільки долото і центратори великого діаметра забезпечують суттєвий зазор між ними. В процесі викривлення свердловини труба дотикається до стінок свердловини в інтервалах її викривлення, і що більший нахил викривлення і зусилля притискування колони до стінки свердловини, які при цьому виникають, то більшими стають довжина і площа контакту між ними.

За методикою М.М. Александрова зусилля притискання залежать від нахилу і викривлення свердловини в інтервалі, що розглядається, і нижче густини промивальної рідини і ваги нижньої ділянки бурильної. Для розрахунку притискаючих зусиль елементів бурильної колони згідно цієї методики нами було застосовано програму "MathCAD" і отримано графічну залежність зміни притискуючих зусиль в залежності від викривлення на 25-ти метрових інтервалах свердловини (рис. 1). Розрахунки наведено для компоновки низу бурильної колони, що включає:

- долото діаметром 215 мм;
- турбобур ЗТСШ-195 (трисекційний);
- ОБТ 178 мм – довжиною 100 м;
- збалансовані бурильні труби діаметром 127 мм – довжиною 700 м;
- бурильні труби – решта.

Розрахунки свідчать, що залежно від віддалі ділянки поверхні ОБТ чи турбобура до долота в інтервалі викривлення величина притискуючої сили змінюється в певному діапазоні. Відповідно до цього на рис. 1 верхня крива характеризує величину притискуючих зусиль для ділянки КНБК, що знаходиться на максимальній відстані від долота, нижня – на мінімальній. Для розрахунку товщини одного полімерного покриття застосовувалася методика дослідження полімерних покриттів на зношуваність і стирання на приладі АР-40, що має барабан з корундовим покриттям, на який може подаватися змінне зусилля, і металеву підкладку, на яку наноситься полімерне покриття. Після дослідження зразок зважувався для визначення зношуваності (в мг/год).

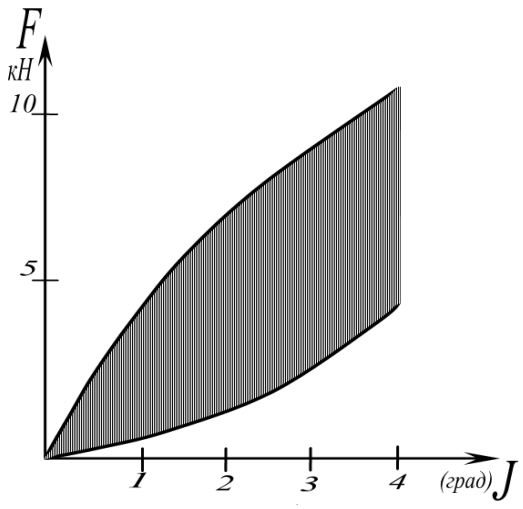


Рисунок 1 – Залежність притискуючих зусиль КНБК від кута викривлення свердловини

За відомої швидкості обертання барабана, його діаметра і часу дослідження визначається шлях тертя, на якому відбулося зношування і навпаки, зношування, яке відбулося на заданому шляху тертя. Товщину зношеного шару визначали з умови:

- об'єм зношеного полімерного покриття за 1 год:

$$V = \pi \cdot R^2 \cdot l ,$$

де R - радіус поверхні барабана;

з іншого боку, цей же об'єм можна визначити як

$$V = \frac{m}{\rho},$$

де m – маса полімерного покриття, зношеного за 1 год, кг;

ρ - густина полімерного покриття, кг/м^3.

Прирівнявши праві частини рівнянь, одержимо:

$$l = \frac{m}{\rho \pi R^2}.$$

Знаючи частоту обертання барабана, легко визначити величину зношування, яка вимірюється в довжині шляху тертя за годину. Залежність зношуваності полімерного покриття від навантаження є лінійною, тому запишеться рівнянням:

$$G = kF$$

де k - коефіцієнт зношуваності, м/год.

Для розрахунку товщини шару зношеного полімерного покриття за заданого питомого зношення, притискуючій силі і шляху тертя, що визначається для заданої глибини свердловини і проходки, використовується та ж програма «MathCAD». Вона ж застосовується і для оберненої задачі – визначення зносостійкості полімерного покриття, необхідної для забезпечення збереження покриття за заданої товщини, притискуючих зусиллях, шляху тертя і проходки. Тип покриття підбирався з врахуванням фрикційності і адгезійності. Для розрахунків необ-

хідної товщі полімерного покриття виходили з таких умов:

- питома зношуваність – 0,15 мг/год;
- зношуваність 1152 м/год;
- коефіцієнт зношуваності – $0{,}65\cdot10^{-8}$ см/мН.

За результатами проведених досліджень випливає:

– зношуваність зростає зі збільшенням притискуючих зусиль та глибини свердловини;

– полімерне покриття завтовшки 0,95 мм може застосовуватись для буріння свердловини до 2000 м за проходки в один рейс, що дорівнює 100 м, і за притискуючої сили 700 Н. Притискуюча сила 700 Н для вищенаведеної КНБК виникає в процесі викривлення стовбура свердловини 1÷1,5° на 25 м. Разом з тим, було отримано результати розрахунку питомої зношуваності полімерного покриття в залежності від його товщини і сили притискування. Ці вимоги зростають зі збільшенням сили і зменшенням товщини покриття. Це ілюструє графічна залежність (рис. 2) необхідної товщини покриття від викривлення стовбура свердловини на різному шляху тертя. Як видно з рисунку 2, зношуваність зростає зі збільшенням цих величин.

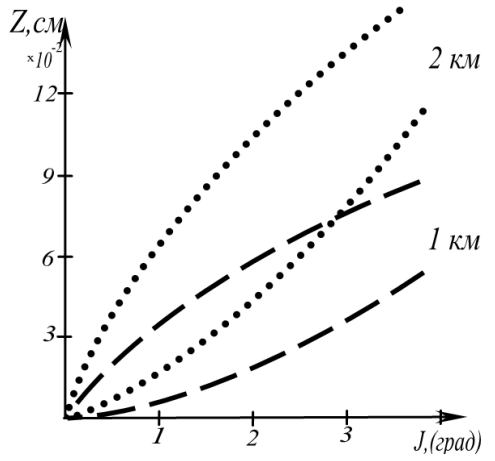


Рисунок 2 – Залежність зношуваності від викривлення стовбура свердловини за різних шляхів тертя (верхня і нижня оцінки)

Як було показано вище, сила прихоплення, що складається з механічної складової F_M, зумовленої дією перепаду тиску і адгезійної сили F_A взаємодії металевої поверхні труб з поверхнею кірки стовбура свердловини, описується рівнянням Дерягіна:

$$F = \mu(F_M + F_F), \qquad (2)$$

де μ - коефіцієнт тертя.

На основі проведених теоретичних та експериментальних досліджень нами встановлено, що полімерне покриття не впливає на механічну складову F_M, але дозволяє зменшити адгезійну складову F_A і коефіцієнт тертя μ.

Адгезійна складова F_A пропорційна добутку питомої адгезійної сили А, що має розмірність тиску, на площу контакту труби з кіркою поверхні стовбура свердловини:

$$F_A = 2AR_T l \sin\alpha, \qquad (3)$$

де R_T - радіус труби, м;

l - довжина елемента труби, м;

α - половина кута охоплення труби кіркою:

$$\alpha = \arccos\frac{R_c^2 - (R_c - R_T)^2 - R_T^2}{2R_T(R_c - R_T)}. \qquad (4)$$

В умовах притискання колони труб до стінки свердловини в інтервалах нахилу і викривлення стовбура свердловини відбувається на стінці ущільнення або консолідація з боку колони труб. За таких умов виникає градієнт тиску. Це призводить до витискання частини рідини з пристінкового шару стовбура свердловини і кірка ущільнюється. Диференціальне рівняння, яке враховує цей процес, що веде до зміни тиску в кірці, задається рівнянням Терцагі:

$$\frac{\partial P_f}{\partial t} = C_g \frac{\partial^2 P_f}{\partial x^2}, \qquad (5)$$

де C_g - коефіцієнт консолідації.

Граничні умови, що накладаються для розв'язання цього рівняння, наступні:

Надлишковий тиск вологи в порах, що діє на стінки свердловини порівняно з пластовим, дорівнює нулю $P_f(0,t) = 0$;

Початковий розподіл гідравлічного тиску в кірці є лінійним, або $P_f(x, 0) = px/L$;

Поверхня труб є непроникна, або $\frac{\partial P_f(L,t)}{\partial x} = 0$.

Тоді розв'язок рівняння Терцагі за даних граничних умов набуде вигляду:

$$P_f(x,\tau) = \frac{8}{\pi^2}\Delta P \times \qquad (6)$$

$$\times \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{(2n-1)^2} \exp\left[-(2n-1)^2 \cdot N\right] \sin\left[\frac{(2n-1)\pi x}{2L}\right],$$

де

$$N = \frac{\pi^2}{4}\tau = \frac{\pi^2 k \cdot t}{4\eta \cdot m_g L^2}; \qquad (7)$$

k - проникність кірки поверхні стовбура свердловини, %;

η - в'язкість фільтрату промивальної рідини, Па·с;

m_g - показник ущільнення кірки, кг/м^2;

L - товщина кірки стінки свердловини, мм;

t - час, с;

C_g - коефіцієнт консолідації;

$\Delta P = P_Г - P_0$ - різниця тисків, Па;

$P_Г$ - гідравлічний тиск, Па;

P_0 - тиск біля стінки свердловини, Па;

τ - фактор часу, с.

На поверхні контакту труби з кіркою тиск рідини і навантаження на частинки кірки будуть змінюватися так:

$$P_f(L,\tau)=\frac{8}{\pi^2}\Delta P\sum_{n=1}^{\infty}\frac{\exp\left[-(2n-1)^2N\right]}{(2n-1)^2}, \quad (8)$$

$$P_S(L,\tau)=\Delta P\left[1-\left(\frac{8}{\pi^2}\right)\sum_{n=1}^{\infty}\frac{\exp\left[-(2n-1)^2N\right]}{(2n-1)^2}\right]. \quad (9)$$

Для визначення коефіцієнта консолідації C_g використовуємо метод Казагранде, який передбачає апроксимацію кривої деформація-час у вигляді залежностей, що поєднують фактор часу $\tau=\frac{C_g t}{L^2}$ і середні напруження в пристінковій кірці стовбура свердловини P_{cp}:

$$\tau=\begin{cases}\frac{\pi}{4}\left(\frac{P_{cp}}{100}\right)^2 & за \quad P_{cp}<53\%;\\ 1{,}781\div 0{,}933\ \lg(100-P_{cp}) & за \quad P_{cp}>53\%.\end{cases}$$

На основі проведених теоретичних досліджень, що стосувалися літературно-патентного пошуку, проведення математичних розрахунків і математичного моделювання процесів, пов'язаних з дослідженнями міцнісно-механічних характеристик полімерного покриття, було проведено експериментальні дослідження з вибору композиту і технології полімерного покриття елементів компоновки низу бурильної колони. Обрано три способи полімерного покриття, які, на наш погляд, є економічно і технологічно вигідними. Вибір полімерного складу, наповнювачів та підкладок проводився з одержаних теоретичних досліджень та за результатами комп'ютерного програмного моделювання в системі «MathCAD», які найбільше задовольняють вимогам зносостійкості.

Для практичного застосування теорії міцності стосовно розрахунку довговічності адгезійного з'єднання метал-полімер рекомендується спосіб визначення енергії активації руйнування і коефіцієнта, що характеризує чутливість матеріалу до механічних напружень.

За експериментальними дослідженнями встановлено:

1) найбільш оптимальний технологічний склад полімерно-композиційного матеріалу, що забезпечує високу зносостійкість покриття на сумарному шляху тертя в межах 40 000÷75 000 метрів;

2) найбільш вдало поєднують в собі поставлені вимоги до полімерного покриття поліаміди, які за зносостійкістю переважають не тільки інші полімери, а й інші антифрикційні метали і сплави;

3) оптимальну товщину полімерного покриття, яка забезпечує необхідну зносостійкість на даному шляху тертя, що складає 0,82÷0,93 мм; разом з тим така мала товщина покриття не сприяє тепловим напруженням на поверхнях;

4) підібрана технологія полімерного покриття елементів бурильної колони не залежить від конфігурації поверхні, що покривається, а дотримання температурно-часового режиму забезпечує не лише адгезійну міцність покриття на поверхні, а й стабільність в процесі експлуатації.

ВИСНОВКИ

Полімерне покриття елементів бурильної колони запобігає корозійно-втомному руйнуванню, що значно підвищує термін їх експлуатації.

Отримано склад полімерного покриття, який за незначної товщини 2÷3 мм та відповідної технології нанесення забезпечує високі фізико-технічні характеристики цього покриття на поверхні елементів бурильної колони і в процесі експлуатації володіє низьким коефіцієнтом зношуваності на достатньо великих шляхах тертя, які складають близько 40÷75 км.

Поверхня бурильної колони, що покрита отриманим полімерним покриттям, володіючи низьким коефіцієнтом тертя (~0,025) у промивальній рідині, не здатна до прихоплень, а це, в свою чергу, забезпечує безаварійне буріння нафтогазових свердловин, суттєве зменшення часу на їх будівництво, відсутність колосальних затрат, спричинених аваріями через прихоплення бурильної колони.

Полімерне покриття внутрішньої поверхні НКТ підвищує їх довговічність в десятки разів, оскільки унеможливлює осідання нафтопродуктів (парафінів і таке ін.) на їх стінках.

Полімерне покриття внутрішньої частини керноприймального пристрою забезпечує збереження цілісності керна, що є важливим фактором для отримання інформації про міцністні характеристики породи, в якій проводиться процес буріння.

Процес полімерного покриття є можливим безпосередньо на базі замовника, оскільки є методом, який можна здійснити в умовах нафтогазових промислів з використанням мобільного устаткування. Наявність такої можливості дозволить отримати полімерне покриття на бурильних, обсадних та насосно-компресорних трубах як на зовнішній, так і на внутрішній поверхнях, де це є необхідним, що з досвіду проведених досліджень є економічно вигідним.

Література

1 Дворниченко Г.Л. Диффузиофоретическое осаждение полимерных дисперсий с целью получения защитных покрытий на металле / Г.Л. Дворниченко, Ю.В. Нижник, Т.В. Славиковский, Л.В. Николайчук // Коллоидный журнал. – 1993. – Т. 55, № 1. – С. 45-48.

2 Дерягин Б.В. Микроскопический метод исследования диффузиофореза / Б.В. Дерягин, С.С. Духин, З.Р. Ульберг, Т.В. Кузнецова // Коллоидный журнал. – 1980. – Т. XLII, № 3. – С. 464 - 468.

3 Ульберг З.Р. Диффузиофорез при автоосаждении полимерных покрытий / З.Р. Ульберг, Г.Л. Дворниченко, И.И. Ивженко // Лакокрасочные материалы и их применение. – 1985. – № 3. – С.29-31.

4 Либерман А.И. Влияние параметров хемоосаждения на скорость образования полимерных осадков / А.И. Либерман, В.Л. Таланов, В.В. Верхоланцев // Лакокрасочные материалы и их применение. – 1984. – № 1. – С. 35-38.

5 Крагельский И.В. Трение и износ / И.В. Крагельский. – М.: Машиностроение, 1968. – 480 с.

6 Трение, изнашивание и смазка: Справочник: под ред. И.В. Крагельского, В.В. Алисина. – М.: Машиностроение, 1978. – 400 с. – Кн. 1.

7 Сибирев А.О. Адсорбционные явления при электроосаждении карбоксилсодержащих олигомеров: Дисс. к-та хим.наук. – М., 1987. – 207 с.

8 Мошев В.В. Структурные механизмы формирования механических свойств зернистых полимерных композитов. / В.В. Мошев, АЛ. Свистков, О.К. Гаришин и др. – Екатеринбург: УрС РАН, 1997. – 508 с.

9 Эшелби Дж. Континуальная теория дислокаций / Дж. Эшелби. – М.: Мир, 1967. – 410 с.

10 Фролова И.Н. Механические характеристики дисперсно-наполненных композиционных материалов на основе термопластической матрицы в изделиях / И.Н. Фролова, А.В. Мотавкин, А.И. Жаров, В.А. Телешов // Пластмассы. – 1987. – № 5. – С. 15-18.

11 Паньков А.А. Прогнозирование эффективных упругих свойств сферопластиков обобщенным методом самосогласования / А.А. Паньков // Прикладная механика и техническая физика. – 1999. – № 3. – С. 186-190.

12 Паньков А.А. Анализ эффективных упругих свойств однонаправленного волокнистого стеклопластика обобщенным методом самосогласования / А.А. Паньков // Известия АН. МТТ. – 1999. – № 4. – С.78-86.

Стаття надійшла до редакційної колегії 28.01.13
Рекомендована до друку професором ***Мойсишиним В.М.*** *(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)*
професором ***Давиденком О.М.*** *(Дніпропетровський НГУ, м. Дніпропетровськ)*

Наука – виробництву

УДК 665.6

OPTIMUM FORMULATION OF ASP FOR INJECTION IN OIL RESERVOIR

Khosro Rahimi, Mohammad Hadi Fatehi Sarvestani, Ehsan Sharifara

Science and Research branch, Islamic Azad University in Iran, Petroleum Department,
tel. +38 093 0546801, e-mail: aspirant7@yandex.ru

Проведено аналіз оптимального складу інгібіторів корозії ASP для нагнітання у нафтовий пласт.
Звертається увага на проблему додавання води в нафтовий резервуар, що є, на думку автора, єдиним методом відновлення тиску в резервуарі.
Ключові слова: інгібітор корозії, нафтовий резервуар, поліакриламід, поверхнево-активні полімери, лужні поверхневі полімери.

Проведен анализ оптимального состава ингибиторов коррозии ASP для нагнетания в нефтяной пласт.
Обращается внимание на проблему добавления воды в нефтяной резервуар, что является, по мне нию автора, единственным методом восстановления давления в резервуаре.
Ключевые слова: ингибитор коррозии, масляный резервуар, полиакриламид, поверхностно-активные полимеры, щелочные поверхностные полимеры.

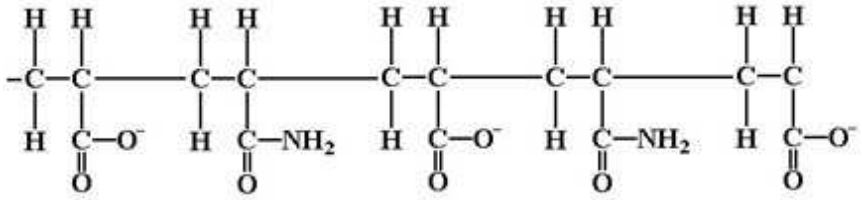
Enhanced Oil Recovery is not a new process and it has been utilized by the Oil and Gas industry for several decades, particularly in the use of water flooding as a secondary recovery measure to ensure maintenance of reservoir pressure.[1] Adding water to an oil reservoir may seem an odd thing to do- anything added to the reservoir should aid in maintaining reservoir pressure, so why add water, as oil and water do not mix? The problem is that most oil reservoirs are solution gas driven, this means that as the oil is produced the reservoir pressure is reduced and the gas that was held in solution is released and expands. This process drives the oil to the producing wells, however the gas is also free to flow and be produced. Once the gas is produced, the reservoir's energy is lost and reservoir pressure is reduced. If this process is the only method of recovery, it will only yield up to 20% of the reservoirs total volume.
Keywords: corrosion inhibitor, oil reservoir, polyacrylamide, surfactant-polymer flooding, alkaline surfactant polymer

Introduction

Water flooding is used in a controlled fashion to maintain and reverse this loss of pressure, and if properly designed can double the recovery values up to 40% [2]. All of this sounds very good and highly feasible, however, there are many obstacles to good recovery rates from water flooding, not least the type of reservoir. Much of the world's oil is held in carbonate reservoirs [3], which are likely to exhibit low porosity and may be highly fractured. These two characteristics, in addition to oil-to-mixed wet rock properties, usually results in low recovery. When Enhanced Oil Recovery (EOR) strategies are pursued, the injected fluids will likely flow through the fracture network, bypassing oil in the rock matrix. The high permeability in the fracture network, and its low equivalent porous volume, result in early breakthrough of the injected fluids. This can result in at least 40% of the assumed recoverable oil reserves remaining in place. This has led to the development of several strategies in Enhanced Oil Recovery; the main methods are listed below. Note that the gas most commonly used is carbon dioxide:

– Water-Alternating-Gas (WAG) Injection;
– Simultaneous Water-and-Gas (SWAG) Injection;
– Foam Assisted Water-Alternating-Gas Injection;
– Hydrocarbon (HC) Miscible Gas Injection;
– Thermal Enhanced Oil Recovery;
– Microbial Enhanced Oil Recovery (MEOR);
– Chemical/Surfactant Enhanced Oil Recovery.

The importance of this 'new' or revisited technology cannot be over emphasized. The high oil price, and its continued stability at these levels [4], has a bearing on the investment strategies in the application of EOR techniques. However, probably more important for Western economies is the ability to achieve more hydrocarbon exploita-



Picture 1

tion from proven reserves in a politically stable environment. The energy crisis for the 'West' is on our doorstep according to many commentators [5].

Chemical EOR

Deployments of chemical EOR were at their most active during the 1980's and peaked, particularly in the United States, around 1986, which was coincident with a high oil price [6]. Usually, these treatments used polymer flooding, the three main treatments which are listed below:

– Polymer Flooding;
– Surfactant - Polymer Flooding;
– Alkali - Surfactant - Polymer Flooding.

Each of these methodologies will now be discussed along with the chemical technologies deployed. There will also be a section on novel and other chemical techniques.

Polymer Flooding

This been the most used EOR chemical method in both sandstone and carbonate reservoirs. Data collected up until 2004 has shown more than 290 polymer field projects had been reported in the literature [3], with more than half of these treatments being conducted in the United States in the 1980's. In the last three years there has again been a dramatic increase in the application of this technology, coincident with an era of high oil prices.

Most of the polymer floods used water-soluble polyacrylamides and biopolymers (polysaccharides and cellulose polymers). The average polymer injection is between 19 and 150 lb./acre-ft., with concentrations ranging from 50 to 3700 ppm, respectively [7]. Historically such treatments gave up to an additional 18% of the recoverable reserves, which is pretty close to target recoveries of 60% if well-planned water flooding has also been used for a period of time. This technology has now been revisited and has become more tailored to the specific reservoir conditions, leading to further increased recoveries of hydrocarbon.

In the last decade much work has been conducted in simulating reservoir conditions in order to accurately assess the realistic outcomes of chemical treatments [8]. This has lead to improved and optimized treatments and a better understanding of the chemical and physical process at work [9].

By far the major polymer used in the chemical EOR are polyacrylamides, a typical structure is shown on picture 1.

Polyacrylamide (PAM) is a long-chain molecule / polymer commonly used to clean wastewater. Historically the primary market for this compound has been municipal wastewater treatment facilities. It makes the fine solids in treated water adhere to one another until they become big enough to settle out or be captured by filters to make sewage sludge. In terms of EOR applications these molecules offer a number of critical properties. The intention of these polymer additives when added to the injection water is to aid the sweep efficiency at the waterfront and ensure more oil is 'pushed' to the producing wells. They do this by creating favorable viscosity conditions and good mobility control. In order for this to occur a number of properties are essential [10]. These are listed below:

– Good water solubility;
– Long term thermal stability;
– Good stability to divalent cations in particular calcium;
– Good resistance to mechanical degradation;
– High injectivity capability;
– Low adsorption characteristics;
– Microbial stability.

Across this range of characteristics, polyacrylamides offer the best fit even although they show some degradation at high temperatures and are subject to precipitation by calcium at high calcium ion concentrations [11]. To overcome these shortcomings many of the manufacturers have engaged in a variety of chemical solutions based around developing a wide range of homologous polymers from a hundreds of different monomers: in particular vinyl, allylic and acryloyl. These result in a wide range of chemistries and structures such as hydrophobic, associative, rod-like, branched, comb, star, zwitterionic, sulfonated, and heat resistant. The polymerisation processes developed using macro-initiators, macro transfer agents, new polymerisation techniques and micellar polymerisation have resulted in new polymers with extremely high molecular weights, HPAM up to 30 millions g/mol and more. In addition to molecular weight, polymer architecture and polymer solution formulations are wide and varied and claimed to fulfill all specific EOR requirements.

The main method of adaption of the polyacrylamide polymer is controlled by selective hydrolysis. Partially hydrolyzed polyacrylamide molecules carry polar amide groups and ionizable carboxyl groups, which impart water solubility to the polymer. The carboxyl groups dissociate and leave negatively charged macro-ions and positively charged counter-ions, leading to polyelectrolyte property in aqueous solution. In comparison with neutral polymers polyelectrolytes gain some advantages, as the solution viscosity is higher than neutral polymers with the same concentration; consequently they present better rheological properties

as a thickening agent. As a result of anionic character, partially hydrolyzed polyacrylamide absorbs disperse particles possessing positive charges through ionic attraction and some neutral particles through hydrogen bonding. These properties make it ideal as a pushing fluid additive and profile modifier in Enhanced Oil Recovery applications [12].

Other water-soluble polymers have been used in Enhanced Oil Recovery however they are not as versatile or applicable to as wide a range of conditions as the hydrolyzed polyacrylamides. These include:

– Xanthan gum;
– Guar gum;
– Carboxymethylcellulose (CMC);
– Hydroxyethylcellulose (HEC).

The much higher molecular weights of the polyacrylamides that can now be achieved also aid increased viscosity and sweep efficiency. Typically polyacrylamides can be 13 million molecular weight, as opposed to, 2-3 million for xanthan gum.

Surfactant /Polymer Flooding

Surfactant-polymer flooding, also known as micellar polymer flooding, has been the second most used EOR chemical method in light and medium crude oil reservoirs. However, reported field projects are relatively low in comparison with polymer floods. Although this recovery method has been considered a promising EOR process since the 1970's, the high concentrations and cost of surfactants and co-surfactants combined with the low oil prices until recently, have limited its use.

The most common type of surfactants used in micellar or surfactant polymer floods are petroleum sulphonates and synthetic alkyl sulphonates, which usually require the use of co-surfactants (non-ionic surfactants) or co-solvents, mostly alcohols. These are added to reduce potential surfactant-formation brine incompatibilities and potentially reduce chemical adsorption; in some cases a pre-flush of fresh water has also been used. Again, water-soluble polyacrylamides have been the most common polymer used in these projects with a few cases using biopolymers. In some cases these application have claimed to give significant recoveries [13].

Surfactant-polymer water floods are employed in low permeability reservoirs (0.1 – 100 mD) where it is difficult to inject water. This process can also be employed as a tertiary recovery method where conditions are such that polymer and/or alkali cannot be introduced into the reservoir. This could be the case where the permeability is too low, the temperature is too high, or the salinity is too high to include polymer. This process can also be used where the amount of divalent cations is too high to use alkali (see later section). A surfactant-polymer water flood increases oil recovery by increasing injectivity and lowering interfacial surface tension.

It is the case that surfactants alone have been used in chemical flooding, however, this is seen as a rather expensive option with recoveries being no greater than the combination treatment [14]. The surfactant flooding process suffers from a significant drawback. This is in the sensitiveness of the aqueous surfactant solutions currently being used, to mono-and divalent ions present in the reservoir. Although carbonated water floods have been successful in laboratory studies, the few reported field test statistics indicate that it is not particularly attractive, possibly in view of the extended project life necessitated by the injection of many pore volumes.

In many cases surfactant is added after a polymer flood has been in operation for some time [15]. This is particularly important where decreasing or poor injectivity is observed in the polymer injection wells [16]. As injectivity decreases the recovery rates and benefits from polymer flooding decrease, there is increasing casing damaged caused by high injection pressures.

This has supported further work in recent years in a new high oil price era to examine other potential surfactant additives. Workers have reported results for a number of promising EOR surfactants based upon a fast, low-cost laboratory screening process that is highly effective in selecting the best surfactants to use with different crude oils. Initial selection of surfactants is based upon desirable surfactant structure. Phase behavior screening helps to quickly identify favorable surfactant formulations. Salinity scans are conducted to observe equilibration times, micro-emulsion viscosity, oil and water solubilisation ratios and interfacial tension. Co-surfactants and co-solvents are included to minimize gels, liquid crystals and macro-emulsions and to promote rapid equilibration to low-viscosity micro-emulsions. Branched alcohol propoxy sulfates, internal olefin sulphonates, and branched alpha olefin sulphonates have been identified as good EOR surfactants using this screening process [17. These surfactants are available at low cost and are compatible with both polymers and alkali such as sodium carbonate and thus are good candidates for both surfactant-polymer and alkali-surfactant-polymer EOR processes.

Other workers [18] have examined different types of surfactants for effectiveness in tertiary oil recovery (TOR). The selected surfactant formulations were tested for enhanced oil recovery using core flood tests on Berea sandstones. Effective were low 1-naphthol concentrations dissolved in 1-butanol in alkyl polyglycoside surfactant formulations, which led to significant additional incremental oil recovery (40% TOR) due to dramatic reductions in interfacial tension.

Alkali-Surfactant-Polymer Flooding

Alkaline Surfactant Polymer (ASP) combines the key mechanisms from each of the previous Enhanced Oil Recovery chemical methods. Generally, ASP formulations use moderate pH chemicals such as sodium bicarbonate (NaHCO3) or sodium carbonate (Na2CO3) rather than sodium hydroxide (NaOH) or sodium silicates. Main functions of alkaline additives are to promote crude oil emulsifi-

cation and increase ionic strength, decreasing interfacial tension (IFT) and regulating phase behavior. The alkaline additives also help to reduce the adsorption of anionic chemical additives by increasing the negative charge density of mineral rocks and at the same time making the rock more water-wet. Thus, the use of alkaline agents contributes to reduce the surfactant concentrations making ASP formulations less costly than conventional surfactant formulations. Again, the most common products that have been used are petroleum sulphonates.

As before, the main function of the surfactants is to reduce interfacial tension between the oil and the injected aqueous formulation. The injected surfactants may sometimes form mixed micelles (at the oil water interface) with in-situ natural surfactants, broadening the alkali concentration range for minimum interfacial tension. On the other hand, the polymer (usually polyacrylamides) is used to reduce water mobility and sweep efficiency by increasing the solution's viscosity and decreasing effective permeability when it is adsorbed onto the formation [19, 20].

Alkaline Surfactant Polymer flooding is an oil recovery method that has traditionally been applied to sandstone reservoirs. However, ASP has also been tested in carbonate formations in the laboratory [21]. The results of this and other studies have shown that the ASP injection slug has to be prepared in softened seawater and be protected with pre and after slugs of softened seawater.

Additionally, recent studies on wettability alteration during surfactant flooding of carbonate minerals showed that commercial anionic surfactants (Alkyl aryl ethoxylated sulphonate and propoxylated sulfates) can change the wettability of calcite surface to intermediate/water-wet conditions [22]. These results suggest that conventional ASP formulations may be used in carbonate reservoirs.

Some Closing Remarks

EOR technologies have demonstrated their capacity to increase oil production and total recovery factors, extending reservoir/asset life, all while being economically viable. High initial capital investments and high marginal costs have limited their widespread application around the world. However, incremental improvements of existing technologies have been achieved in the last decade reducing the cost per barrel of many EOR projects, with CO2 injection (continuous or in water alternating mode) as the best example.

Oil reserves are not expected to be only produced in EOR terms via CO2 injection, either from natural or from industrial sources, other EOR methods including chemical flooding will be considered and deployed.

The maturity of a many fields will require the use of surfactant based recovery methods to recover residual oil in water-flooded reservoirs. Surfactant, alkali and polyacrylamide polymer, have been the most used chemical additives either in combined processes or pure polymer floods. Additionally, the applicability of sodium carbonate and polyacrylamides in carbonate and sandstone reservoir has been proven effective [22, 23].

Although petroleum sulphonates have been the most common surfactant used in micellar or ASP floods [17], the use of non-ionic and cationic surfactants have been evaluated at lab and field scale for carbonate reservoirs [18]. Surfactant injection may be also benefit from the relatively low costs associated with water flooding projects, even more if a water flood is already in place.

Alkali-Surfactant (AS) injection, to improve well injectivity in low permeability formations under water flooding [25] in oil-wet limestone reservoirs [26], has certainly provided new insights useful for chemical floods in carbonate reservoirs.

To the author's knowledge new chemical developments are focused in two major areas:

– Selection of organic compounds with alkaline properties that improve chemical formulations conventionally used in EOR by chemical methods and that reduce, or eliminate, the softening of injection waters due to their high solubility and their capability of sequestering divalent cations.

– New fluid formulations based on new-engineered materials ('Nanomaterials') able to modify, in a controlled way, rock-fluid and fluid-fluid properties and also behave as tailored surfactants improving the flow of oil in the porous media.

Over the last few decades, Enhanced Oil Recovery by gas injection has been the dominant recovery method for crude oil reservoirs, especially in carbonate reservoirs with low permeability/injectivity.

A number of reviews show that EOR chemical methods, particularly in carbonate reservoirs, have made a relatively small contribution in terms of total oil recovered. Further studies are required to improve economic viability of technically proven EOR chemical methods, such as ASP, for their application in other fields including remote and small fields with no short term access to CO_2.

Crude oil reserves, particularly in the US in carbonate reservoirs; can be increased through the application of proven EOR methods, which are increasingly viable from the point of view of their costs and effectiveness.

Chemical methods will benefit greatly from new strategies that reduce the requirements on the specifications of the injection water and use existing infrastructure without much new investment.

All of these factors will present EOR techniques, and particularly chemically supported Enhanced Oil Recovery, as a viable and effective method increasing oil production. The major caveat to all of this will be the future price of crude oil.

References

1 M. Muskat, *Physical Principles of Oil Production*, McGraw-Hill Book Company, 1949.

2 S. B. Rachmawati, R. J Sustakoski, T. P. Whitacre, D. J. Goggin, M. Levy, A. B. Bernath, K. Anarbaci and G. Wu, 'Patern Waterflood Development in Giant Mature Oil Field: Minas NW

Segment Reservoir Characterisation, Scale-Up and Flow Modelling', SPE 38706, *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, 5-8 October 1997 San Antonio, Texas.

3 E. Manrique*, M. Gurfinkel and V. Muci, 'Enhanced Oil Recovery Field Experiences in Carbonate Reservoirs in the United States', *25th Annual Workshop and Symposium; Collaborative Project on Enhanced Oil Recovery*, International Energy Agency, 5-8 September 2004, Stavanger, Norway.

4 http://www.vanguardngr.com/2012/06/opec-worries-over-oil-prices-economic-sustainability/

5 S. Leeb and D. Leeb, *The Oil Factor: Protect Yourself - and Profit from - the Coming Energy Crisis*, Warner Books, 2004

6 J. Leonard, 'Production/Enhanced Oil Recovery Report', *Oil & Gas Journal*, 24 April 1986.

7 R. Needham and P. H. Doe, 'Polymer Flooding Review', SPE 17140, *Journal of Petroleum Technology*, December 1987.

8 G. Anderson, *Simulation of Chemical Flood Enhanced Oil Recovery Processes Including the Effects of Reservoir Wettability*, (Masters Thesis), University of Texas, 2006.

9 N. F. Najafabadi, M. Delshad, K. Sepehmoori, Q. P. Nguyen and J. Zhang 'Chemical Flooding of Fractured Carbonates Using Wettability Modifiers', SPE 113369, *SPE/DOE Symposium on Improved Oil Recovery*, 20-23 April 2008, Tulsa, Oklahoma.

10 R. G. Rylesand and J. V. Cicchiello, 'New Polymers for EOR Applications', SPE 14947, *SPE Enhanced Oil Recovery Symposium*, 20-23 April 1986, Tulsa, Oklahoma.

11 D. B. Levitt and G. A. Pope, 'Selection and Screening of Polymers for Enhanced Oil Recovery', SPE 113845,*SPE/DOE Symposium on Improved Oil Recovery*, 20-23 April 2008, Tulsa, Oklahoma.

12 J. K. Borchardt, 'Oil-Field Chemistry: Enhanced Recovery and Production Stimulation', *American Chemistry Society*, ed. by J. K. Borchardt and T. F. Yen, 1989, pp. 27-39.

13 B. Kalpakci, T. G. Arf, J. W. Barker, A .S. Krupa, J. C. Morgan and B. P. Neira, 'The Low-Tension Polymer Flood Approach to Cost-Effective Chemical EOR', SPE 20220, 7th *SPE/DOE Symposium on EOR*, April 1990, Tulsa, Oklahoma.

14 A. Farouq and G. J. Colmont, 'Appraisal of Micellar Flooding, Carbon Dioxide and Surfactant Flooding Projects', SPE 6624, *SPE Eastern Regional Meeting*, 26-28 October 1977, Pitsburgh, Pennsylvania.

15 F. Yang, 'Surfactant Boosts Polymer EOR Effectiveness at Daring', *Oil & Gas Journal*, 5 June 2006.

16 C. Bardon, 'Influence of Very Low Interfacial Tensions on Relative Permeability,' *SPE Journal*, October 1990, pp. 391-401.

17 D. B. Levitt, A. C. Jackson, C. Heinson, S. L. N. Britton, T. Malik, V. Dwarakanath and G. A. Pope, 'Identification and Evaluation of High- Performance EOR Surfactants', SPE 100089, *SPE/DOE Symposium on Improved Oil Recovery*, 22-26 April 2006, Tulsa, Oklahoma.

18 S. Iglauer, Y. Wu, P. Shuler, Y. Tang and W. A. Goddard III, 'New Surfactant Classes for Enhanced Oil Recovery and Their Tertiary Oil Recovery Potential', *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol. 71, 2010, pp. 23–29.

19 P. J. Schuler, R. M. Lerner and D. L. Kuehne, 'Improving Chemical Flood Efficiency with Micellar/Alkaline/Polymer Processes', SPE 14934, *SPE/DOE 5th Symposium on EOR*, April 1986, Tulsa, Oklahoma.

20 E. Manrique, L. Anselmi, C. Romero and L. Chacon, 'Alkali/Surfactant/Polymer at VLA 6/9/21 Field in Maracaibo Lake: Experimental Results and Pilot Project Design', SPE 59363, *2000 SPE/DOE Improved Oil Recovery Symposium*, April 2000, Tulsa, Oklahoma.

21 H. S. Al-Hashim, V. Obiora, H. Y. Al-Yousef, F. Fernandez and W. Nofal, 'Alkaline Surfactant Polymer Formulation for Carbonate Reservoirs', *Petroleum Science and Technology*, Vol. 23, Issue 5-6, 2005, pp. 723-746.

22 B. Seethepalli, K. Adibhatla, and K. Mohanty, 'Wettability Alteration During Surfactant Flooding of Carbonate Reservoirs', SPE 89423, *2004 SPE/DOE 14th Symposium On IOR*, 17-21 April 2004, Tulsa, Oklahoma.

23 H. D, Yang and E. E. Wadleigh, 'Dilute Surfactant IOR-Design Improvement for Massive, Fractured Carbonate Applications', SPE 59009, *2000 SPE International Petroleum Conference and Exhibition*, February 2000, Villahermosa, Mexico.

24 W. Demin, Z. Lanshui, C. Jiecheng and W. Junzheng, 'Actual Field Data Show that Production Costs of Polymer Flooding can be Lower than Water Flooding', SPE 84849, *SPE Asia Pacific International IOR Conference*, 20-21 October 2003, Kuala Lumpur, Malaysia.

25 B. J. Miller, M. J. Pitts, P. Dowling and D. Wilson, 'Single Well Alkaline- Surfactant Injectivity Improvement Test in The Big Sinking Field', SPE 89384, *2004 SPE/DOE 14th Symposium on IOR*, 17-21 April 2004, Tulsa, Oklahoma.

26 H. K. Zubari and V. C. B. Sivakumar, 'Single Well Tests to Determine the Efficiency of Alkaline-Surfactant Injection in a Highly Oil-Wet Limestone Reservoir', SPE 81464, *13th SPE Middle East Oil Show & Conference*, 5-8 April 2003, Bahrain.

Стаття надійшла до редакційної колегії
10.01.13
Рекомендована до друку
професором ***Меджлиса Голам Алі Мансурі***
(Ісламський університет Азад,
Іран, м. Неджефабад)

УДК 622.245

МОДИФІКОВАНА ПАЛИВНО-БІТУМНА ВАННА

І.І. Чудик, М.І. Оринчак, О.С. Бейзик

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська,15, тел. (0342) 727137;
e-mail: d r i l l @ n u n g . e d u . u a

Основним ускладненням, яке зустрічається у процесі буріння нафтових і газових свердловин на родовищах України, є обвалювання та осипання стінок свердловини. Для ліквідації цих ускладнень на сьогоднішній день застосовують силікатну, силікатно-калієву, гідрофобно-адгезійну, гідрофобно-бітумну, модифіковану гідрофобно-бітумну та паливно-бітумну ванни. За результатами проведених лабораторних досліджень для підвищення стійкості стінок свердловини рекомендується модифікована паливно-бітумна ванна (МПБВ), застосування якої порівняно із вказаними вище забезпечує досягнення найбільшого ефекту. Основними компонентами, що входять до складу ванни, є пічне побутове паливо (89,0-93,5%), окислений бітум (5-9%) та сульфонол (1,5-2,0). Термін дії ванни, встановленої у свердловині навпроти горизонтів зі складними гірничо-геологічними умовами, становить 7-8 годин. Приріст міцності високопроникних взірців породи сягає 410%, а низькопроникних – 125-130%. Після встановлення ванни взірці гірських порід зберігають стійкість та високі міцнісні властивості у фільтраті соленасиченого розчину протягом тривалого часу, який коливається: від 50-58 діб – для високопроникних порід і до 68-76 діб – для низькопроникних порід. Результати, отримані експериментальним шляхом, знижують час на ліквідацію ускладнень у свердловині, що сприяє збереженню темпів проходки свердловини.

Ключові слова: пічне побутове паливо (ППП), окислений бітум, обвалювання та осипання стінок свердловини, рідинна ванна, модифікована паливно-бітумна ванна.

Наиболее распространенным осложнением, встречающимся при бурении нефтяных и газовых скважин на месторождениях Украины, являются осыпи и обвалы стенок скважины. Для ликвидации этих осложнений сегодня применяют силикатную, силикатно-калиевую, гидрофобно-адгезионную, гидрофобно-битумную, модифицированную гидрофобно-битумную и топливно-битмную ванны. По результатам проведенных лабораторных исследований с целью повышения устойчивости стенок скважины рекомендуется использование модифицированнй топливно-битумной ванны (МПБВ), применение которой по сравнению с вышеперечисленными обеспечивает больший эффект. Главными компонентами, входящими в состав ванны, являются печное бытовое топливо (89,0-93,5%), окисленный битум (5-9%) и сульфонол (1,5-2,0). Срок действия ванны, установленной в скважине напротив пластов со сложными горно-геологическими условиями, составляет около 7-8 часов. Приращение прочности высокопроницаемых образцов горных пород достигает 410%, а низкопроницаемых – 125-130%. После установления ванны образцы горных пород сохраняют устойчивость и высокие прочностные свойства в фильтрате соленасыщенного раствора на протяжении длительного периода времени, который колеблется в пределах от 50-58 суток для высокопроницаемых пород и до 68-76 суток – для низкопроницаемых пород. Полученные экспериментальным путем результаты способствуют снижению времени на ликвидацию осложнений в скважине, что способствует сохранению темпов проходки скважины.

Ключевые слова: печное бытовое топливо (ПБТ), окисленный битум, обвалы и осыпи стенок скважины, жидкостная ванна, модифицированная топливно-битумная ванна.

The main problem occurred during oil and gas wells drilling in the fields of Ukraine is caving in and sloughing of borehole walls. To eliminate this problem the following bathes are currently applied: silicate, potassium-silicate, hydrophobic-adhesive, hydrophobic-bituminous, modified hydrophobic- bituminous and fuel-bituminous. According to the results of laboratory research, a modified fuel-bituminous bath (MFBB) is recommended to apply for the improvement of borehole walls' stability, because it gives better results in comparison with other above-mentioned bathes. The main components of the bath are household stove fuel (89,0-93,5%), oxidized bitumen (5-9%) and sulphonol (1,5-2,0%). The bath period, settled into the well opposite horizons with complicated mining-geological conditions, is 7-8 hours. The increase of endurance capability of high permeability rock samples reaches 410% and low permeability rock samples - 125-130%. When such a bath is settled the rock samples will preserve their stability and high endurance properties in the filtrate of salt-saturated drilling fluid for a long period of time, which ranges from 50 to 58 days for high permeability rocks and 68-76 days for low permeability rocks. The obtained experimental results reduce time for the elimination of well problems and in such a way decrease costs of the drilling company material and energy resources.

Key words: household stove fuel, oxidized bitumen, crumbling and collapse of the well's wall, silicate-potassium bath, liquid bath, modified fuel -bituminous bath

У процесі буріння глибоких нафтових і газових свердловин в нашій країні найчастіше трапляються обвалювання і осипання стінок свердловини. Більшість родовищ України мають потужні відклади аргілітів, алевролітів, глинистих сланців тощо, які залягають під кутом до горизонту, ускладнених тектонічними порушеннями.

Практика буріння нафтових і газових свердловин в Україні свідчить про численні випадки осипань та обвалювань стінок свердловини, випинання порід та звуження ствола.

Обвалювання та осипання стінок свердловини відбуваються найчастіше під час розбурювання сланців, глин, особливо, поблизу тектонічних порушень. Цей вид ускладнень трап-

ляється повсюди, окрім буріння в міцних породах.

Найчастіше обвалювання та осипання стінок свердловини відбуваються під час розбурювання пластичних сланцевих глин, що залягають під великими кутами, особливо поблизу тектонічних порушень. Однак, на значних глибинах обвалювання відбуваються в породах, незалежно є тектонічні порушення, чи немає. Багато науковців вважають, що їх причиною є геотехнологічні умови проведення, підкреслюючи, що ці ускладнення найчастіше відбуваються у сланцевих та лускатих глинах, в яких відслідковуються тонкі прошарки піску, слюдисті включення з вмістом піриту, марказиту тощо.

За іншою гіпотезою обвалювання та осипання стінок свердловини відбуваються за обставин, пов'язаних зі зниженням густини бурових розчинів, сповільненням темпів буріння та зупинкою буріння. Обвалювання є дуже вагомим видом ускладнень, особливо в інтервалах каверноутворень.

Природа обвалоутворень пов'язана з тим, що через зниження бокового тиску глина пружно розширюється і всмоктує фільтрат із бурового розчину. Фільтрат, проникаючи у тріщини глинистих порід, призводить до збільшення капілярного тиску в них, випучування глини, зменшення слабких сил зчеплення та її розклинювання, що спричиняє обвалювання та осипання стінок свердловини.

Значний вплив на інтенсивність обвалів та осипань стінок свердловини мають набухання і розмокання глинистих порід. При цьому ступінь розпадання глин зумовлений ступенем гідратації глинистих частинок, і швидкості гідратації маси глини, яка дорівнює швидкості дифузії води.

Гідратація та змочування мають вагомий вплив на зміну напруженого стану гірських порід, в яких спостерігається адсорбційне пониження твердості, область поширення якої у глинах дуже велика і з часом практично розповсюджується на весь об'єм взірця. У цьому випадку сили зчеплення між частинками глин екрануються, що призводить до самовільного диспергування без прикладання навантаження до взірця породи, або - до значних деформацій за умови створення навантаження.

Протидіяти руйнуванню стінок свердловини при розбурюванні тектонічно порушених порід дуже складно.

Вітчизняними та зарубіжними науковцями розроблялися різні способи запобігання цих ускладнень і основним способом вважалося застосування бурового розчину з мінімальною фільтрацією або безводного бурового розчину (розчину на вуглеводневій основі). Застосування емульсійних розчинів ситуацію не стабілізувало. Негативні результати від використання гідрофобних емульсій сприяли розробці бурових розчинів на водній основі з мінімальною водовіддачею, що формували тонку щільну фільтраційну кірку з низькими проникними властивостями, що протидіяли проникненню води з розчину у породу. Однак спосіб запобігання обвалювань та осипань, який стосувався тільки зниження фільтрації, недостатньо дієвий. Тому розвиток наукових досліджень був спрямований ще і на збільшення густини бурових розчинів та застосування реагентів, що зменшували б інтенсивність гідратації глинистих порід.

Однак такі заходи не завжди запобігали обвалюванням та осипанням. Тому і на сьогоднішній день для вирішення цієї проблеми немає однозначних рішень. Застосування способів запобігання обвалювання та осипання стінок свердловини, відомих на даний час у літературі та практиці буріння свердловин (зменшення фільтрації, збільшення густини та регулювання реологічних параметрів бурових розчинів) бажаного відчутного ефекту не дають [1].

На серйозну увагу заслуговує застосування паливно-бітумної ванни [2], яку закачують у свердловину після відробки долота або під час ремонтних робіт і встановлюють навпроти горизонтів, схильних до самовільного руйнування у процесі буріння. Проникаючи у стінки свердловини, паливно-бітумна ванна підвищує сили зчеплення між частинками породи, протидіє проникненню фільтрату бурового розчину у стінки свердловини і зменшує інтенсивність осипання та обвалювання стінок свердловини.

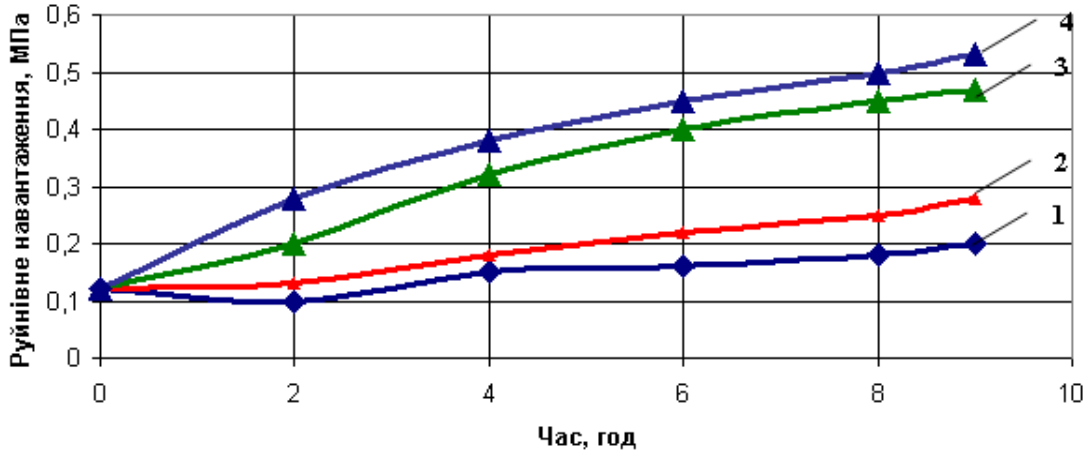
За даними попередніх досліджень [3, 4] паливно-бітумна ванна є ефективним способом підвищення стійкості стінок свердловини і забезпечує збереження міцності гірських порід в окремих випадках протягом 45-50 діб. Проте, не зважаючи на можливість досягнення такої ефективності, промислові підприємства потребують збільшення терміну дії рідинної ванни.

Метою цієї роботи є підвищення стійкості стінок свердловини за рахунок збільшення сил поверхневого натягу між ванною і гірською породою, що забезпечить більш глибоке проникнення паливно-бітумної ванни у стінки свердловини, покращить сили зчеплення між частинками гірської породи і протидіятиме руйнуванню стовбура свердловини.

Із літературних джерел [3, 4] відомо два способи зменшення сил поверхневого натягу між рідинною ванною і стінками свердловини – це застосування поверхнево-активних речовин (ПАР) та домішка до ванни солей. Зважаючи на те, що сіль нерозчинна у пічному побутовому паливі (ППП), то основний акцент було зроблено на застосуванні ПАР. Найпоширенішими ПАР, які розчиняються в гідрофобній рідині, є емультал, украмін, емульсин та сульфонол. Враховуючи, що сульфонол застосовується найчастіше не тільки у практиці буріння, але і під час освоєння свердловин, тому дослідження проведено з його застосуванням.

Отже, до складу модифікованої паливно-бітумної ванни входять ППП, сульфонол та окислений бітум.

Пічне побутове паливо – гідрофобна рідина від світло-коричневого до чорного кольору з різким запахом, випускається згідно галузевого стандарту України (ДСТУ 320. 001 19943.010-98),



1 - 1% високоокисленого бітуму та 99% ППП;
2 - 3% високоокисленого бітуму та 97% ППП;
3 - 5% високоокисленого бітуму та 95% ППП;
4 - 9% високоокисленого бітуму та 91% ППП

Рисунок 1 – Динаміка руйнування високопроникних взірців породи (85% піску+15% глини) залежно від часу та адгезійних властивостей ванни

застосовується для комунально-побутових потреб. Особливістю ППП є підвищений вміст смолистих фракцій, оскільки 90 % палива отримують у процесі прямої перегонки дистилятної фракції між дизельним паливом і мазутом за температури від 160 до 360 °С.

Сульфонол – порошок від світло-жовтого до світло-коричневого кольору, розчинний у воді та вуглеводневій рідині. Масова частка алкилбензолсульфонатів натрію становить не менше 80%, масова частка несульфованих вуглеводнів в перерахунку на активну речовину не перевищує 10%. Показник pH 1% водного розчину становить 7,0-9,0, вологість допускається до 3%, масова частка сульфатів натрію в перерахунку на активну речовину не перевищує 17%, насипна маса 110-170 кг/м^3. Сульфонол транспортують усіма видами транспорту, окрім повітряного, у закритих транспортних засобах, зберігають у закритих сухих неопалювальних приміщеннях у поліпропіленових мішках масою 8,0±0,1 кг. Гарантійний термін зберігання 6 місяців з дати виготовлення.

Адгезійну функцію у модифікованій паливно-бітумній ванні виконує окислений бітум, температура розм'якшення якого становить біля 140-160°С.

Вплив сульфонолу на підвищення стійкості стінок свердловини оцінювали на глинисто-піщаних взірцях породи чотирьох типів:

1) 15% глини та 85% піску;
2) 50% глини та 50% піску;
3) 85% глини та 15% піску;
4) 100% глини.

Зміною концентрації глини регулювали проникність взірців у широких межах. Технологія виготовлення глинисто-піщаних взірців та методика підготовки до лабораторних досліджень аналогічна як і при розробці рецептури та дослідженні паливно-бітумної ванни.

Оптимальну рецептуру модифікованої паливно-бітумної ванни визначали з досліджень, проведених нами раніше, результати яких наведено на рис. 1, 2, 3, 4.

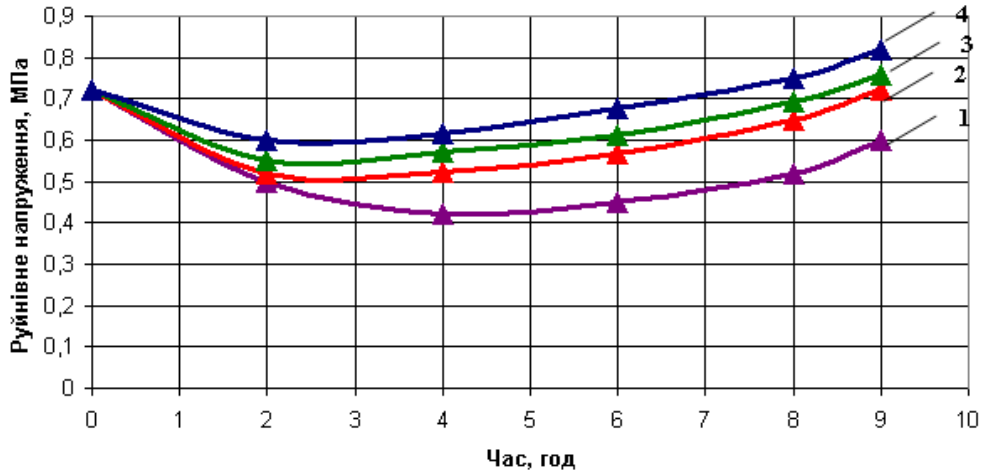
На графічних залежностях вздовж осі ординат відкладено руйнівне навантаження взірців породи, а вздовж осі абсцис – час перебування їх у паливно-бітумній ванні.

На цих рисунках видно, що незалежно від проникності лабораторних взірців породи їх міцність спочатку незначно падає, а потім зростає.

При цьому зменшення міцності у високопроникних і середньопроникних породах інтенсивніше (20÷30%) порівняно з низькопроникними та слабкопроникними породами (5÷18%). Зменшення міцності взірців породи на початку досліду, на нашу думку, пов'язане з тим, що клеючі властивості окисленого бітуму на цьому проміжку часу менші, ніж розклинююче зусилля, яке виникає від дії ППП. При подальшому перебуванні взірців породи в ванні міцність їх збільшується, досягає максимального значення, і через 7÷8 годин стабілізується. Отже, мінімальний час перебування взірців породи в ванні коливається в межах 7÷8 годин, причому менший час характерний для середньо- і високопроникних порід, а більший час для низько- і слабкопроникних порід.

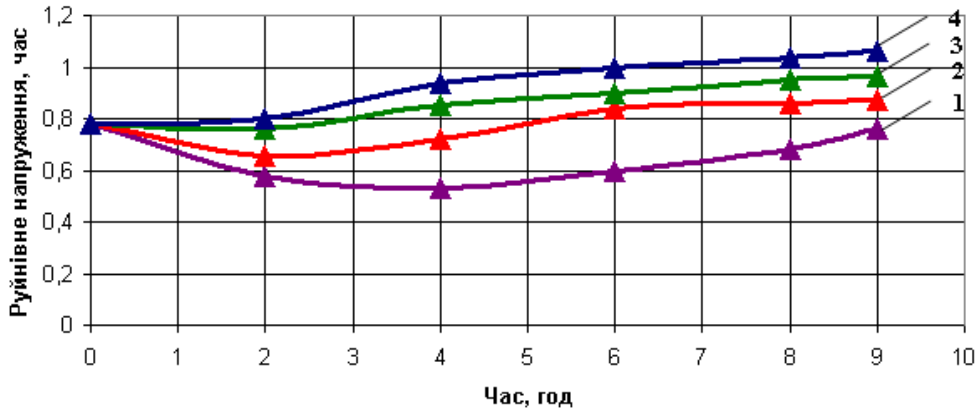
Важливою особливістю наведених залежностей є вплив концентрації окисленого бітуму у ванні на міцність взірців породи. Зі збільшенням концентрації клеючої речовини міцність взірців міцність взірців зростає і досягає максимального значення, а відтак стабілізується або спадає.

Максимальна концентрація окисленого бітуму, за якої міцність лабораторних взірців найбільша, коливається в межах 5-9%. За такого значення концентрації клеючої речовини, на нашу думку, на поверхні взірців породи утворюється тонка бітумна плівка, яка протидіє подальшому проникненню ванни всередину. Тому, попри зростання концентрації бітуму у ванні міцність взірців породи не збільшується.



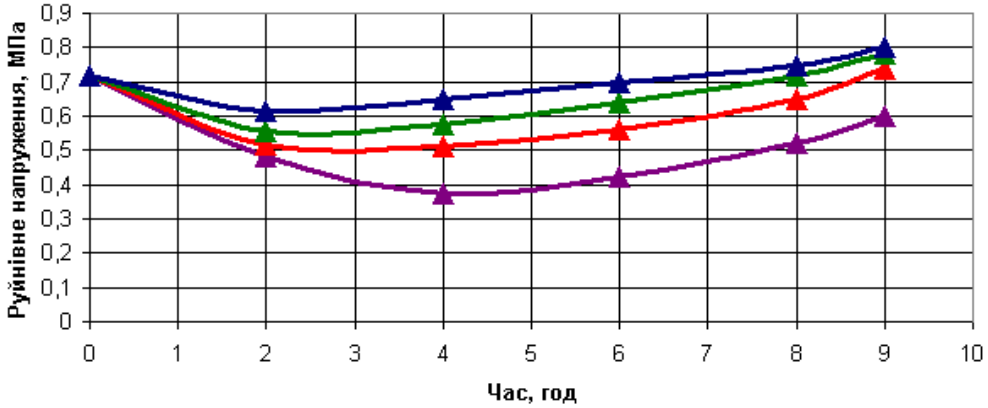
1 - 1% високоокисленого бітуму та 99% ППП;
2 - 3% високоокисленого бітуму та 97% ППП;
3 - 5% високоокисленого бітуму та 95% ППП;
4 - 9% високоокисленого бітуму та 91% ППП

Рисунок 2 – Динаміка руйнування середньопроникних взірців породи (50% глини+50%піску) залежно від часу та адгезійних властивостей ванни



1 - 1% високоокисленого бітуму та 99% ППП;
2 - 3% високоокисленого бітуму та 97% ППП;
3 - 5% високоокисленого бітуму та 95% ППП;
4 - 9% високоокисленого бітуму та 91% ППП

Рисунок 3 – Динаміка руйнування низькопроникних взірців породи (85%глини+15%піску) залежно від часу та адгезійних властивостей ванни



1 - 1% високоокисленого бітуму та 99% ППП;
2 - 3% високоокисленого бітуму та 97% ППП;
3 - 5% високоокисленого бітуму та 95% ППП;
4 - 9% високоокисленого бітуму та 91% ППП

Рисунок 4 – Динаміка руйнування слабкопроникних взірців породи (100% глини) залежно від часу та адгезійних властивостей ванни

Таблиця 1 – Вплив концентрації сульфонолу на стійкість взірців породи

Тип взірця породи	Концентрація сульфонолу, %	Час стійкості взірців, год		
		глинистий розчин	хлоркалієвий розчин	соленасичений розчин
15% глини та 85% піску	0	5	500	900
	0,5	50	630	1015
	1,0	80	670	1095
	1,5	105	725	1130
	2,0	115	800	1150
50% глини та 50% піску	0	15	625	1050
	0,5	65	800	1150
	1,0	100	860	1265
	1,5	135	940	1345
	2,0	160	1000	1400
85% глини та 15% піску	0	20	1150	1350
	0,5	80	1300	1500
	1,0	120	1400	1600
	1,5	150	1430	1650
	2,0	180	1460	1700
100% глини	0	25	1300	1450
	0,5	90	1450	1600
	1,0	130	1525	1700
	1,5	165	1600	1800
	2,0	205	1650	1850

Суттєвий вплив на міцність взірців породи, які розміщені у паливно-бітумній ванні, має їх проникність. Найбільше значення приросту міцності спостерігається у високопроникних взірцях породи і дорівнює 410%, дещо менше – для середньопроникних порід – 150%, найменшого – для низько- та слабкопроникних порід – 125-130%. Паливно-бітумна ванна підвищує міцність всіх типів взірців породи, а тому її можна назвати універсальною.

Отже, паливно-бітумна ванна з концентрацією окисленого бітуму 7%, пічного побутового палива – 93% та терміном витримування ванни у свердловині – 8 годин прийнята нами за оптимальну рецептуру для подальших досліджень.

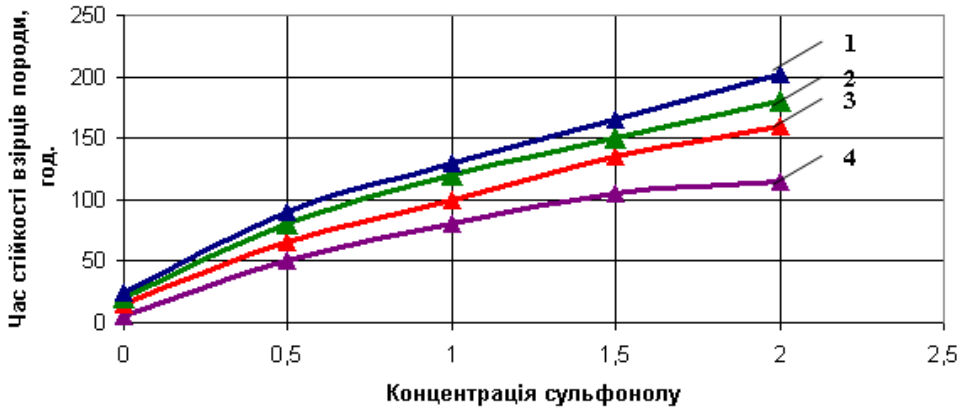
Для вивчення впливу сульфонолу на термін дії ванни всі взірці спочатку поміщали у модифіковану паливно-бітумну ванну (МПБВ) і витримували протягом 8 годин, а концентрацію сульфонолу в МПБВ змінювали від 0,5% до 2,0%. Відтак взірці породи виймали з ванни і кожну групу з однаковою проникністю ділили на три підгрупи. Першу підгрупу взірців поміщали в прісну воду, яка моделює звичайний глинистий розчин; другу підгрупу – у мінералізований розчин (5% $KCl+H_2O$), яка моделює інгібуючий хлоркалієвий розчин; третю підгрупу – в соленасичену воду (26%$NaCl+H_2O$), яка моделює соленасичений стабілізований розчин. Під час перебування взірців породи у різних типах моделей бурових розчинів їх зважували та одночасно спостерігали за самовільним руйнуванням.

Досліди продовжували до повного руйнування взірців. За результатами експериментів встановлено, що найшвидше руйнуються взірці у прісній воді, повільніше – у мінералізованих фільтратах, що, мабуть, пов'язано із присутністю у фільтраті іонів K^+ та Na^+, які, проникаючи між шари кристалічної гратки глин, збільшують сили зв'язку між ними і сповільнюють їх руйнування. Зміна маси взірців породи залежить від їх проникності. Найбільший приріст маси спостерігається у високо- і середньопроникних породах, найменший – у низькопроникних.

Вплив сульфонолу на стійкість взірців породи наведено у табл. 1, 2, 3 та зображено у вигляді графічних залежностей на рис. 5, 6, 7.

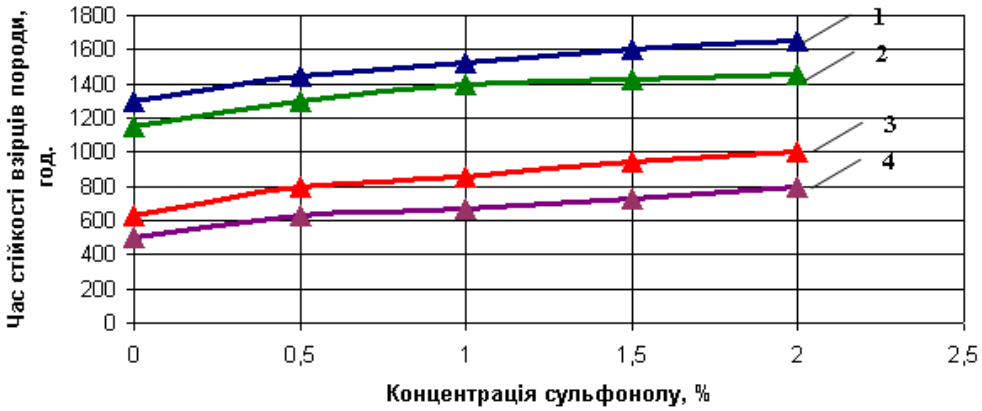
Із наведених рисунків бачимо, що зі збільшенням концентрації сульфонолу в паливно-бітумній ванні тривалість стійкості взірців породи повільно зростає, досягає максимального значення, а потім стабілізується. Мінімальне значення концентрації сульфонолу, при якому досягається максимальна тривалість стійкості взірців породи, прийняте нами за оптимальне значення. Ця величина залежить від проникності взірців породи.

Для прикладу розглянемо залежності, наведені на рис. 5, де наведено результати досліджень змодельованих найгірших умов у свердловині, оскільки за фільтрат бурового розчину вибрано воду, яка має низьку в'язкість, через що може проникати у стінки свердловини на значну глибину, спричинюючи інтенсивні обвали та осипання стінок свердловини. Як бачимо



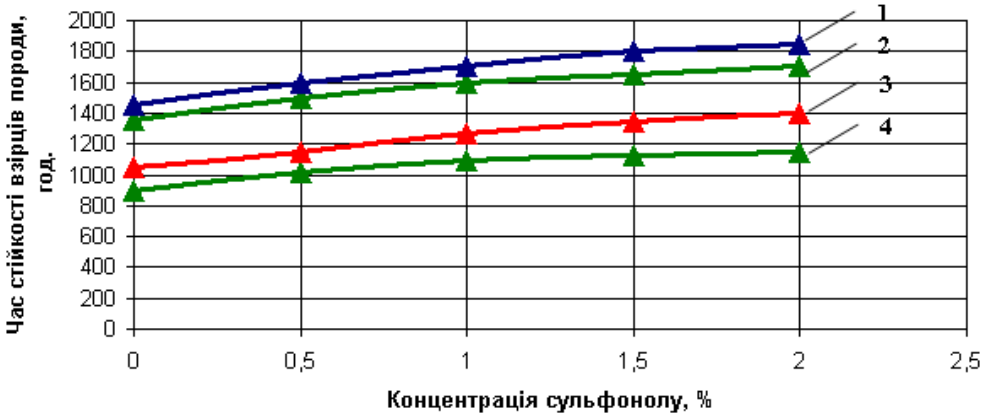
1) 15% глини та 85% піску;
2) 50% глини та 50% піску;
3) 85% глини та 15% піску;
4) 100% глини

Рисунок 5 – Вплив концентрації сульфонолу на стійкість взірців породи у фільтраті глинистого розчину



1) 15% глини та 85% піску;
2) 50% глини та 50% піску;
3) 85% глини та 15% піску;
4) 100% глини

Рисунок 6 – Вплив концентрації сульфонолу на стійкість взірців породи у фільтраті хлоркалієвого розчину



1) 15% глини та 85% піску;
2) 50% глини та 50% піску;
3) 85% глини та 15% піску;
4) 100% глини

Рисунок 7 – Вплив концентрації сульфонолу на стійкість взірців породи у фільтраті соленасиченого розчину

з графічних залежностей, наведених на рис. 5, найбільший приріст стійкості взірців породи спостерігається у високопроникних породах (крива 1 – 1 тип взірця, крива 2 – 2 тип взірця, крива), дещо менший – у низькопроникних породах (крива 3 – 3 тип взірця, крива 4 – 4 тип взірця). Приріст стійкості взірців породи під дією сульфонолу незначний і становить від 2,9 до 7,7 %.

Це пояснюється, на нашу думку, значною агресією води, яка частково розчиняє плівки сульфонолу, що утворились на поверхні взірців породи. Оптимальна домішка сульфонолу, при якій досягнуто максимального приросту стійкості взірців породи, коливається межах 1,5-2,0%.

Аналогічні залежності зміни стійкості взірців породи від дії модифікованої паливно-бітумної ванни спостерігались і у фільтратах мінералізованого та соленасиченого розчинів, що підтверджується графіками, наведеними на рис. 6, 7.

Основною відмінністю отриманих залежностей від наведених на рис. 5 є значно більша первинна стійкість взірців породи від тих, які перебували у воді. Збільшення первинної стійкості взірців породи, як було відзначено раніше, пов'язано із впливом іонів K^+ та Na^+ у фільтраті розчину, які проникаючи між шарами кристалічної гратки глини, збільшують сили взаємодії між ними і протидіють руху води у взірці породи.

Оптимальна домішка сульфонолу, при якій досягається максимальне зростання стійкості взірців породи, становить від 1,5 до 2,0%, як і для взірців у прісному буровому розчині. Приріст стійкості взірців породи у фільтраті хлоркалієвого розчину зростає від 11,0 до 15,4 діб, а у фільтраті соленасиченого розчину – від 10,7 до 15,8 діб. Як свідчать наведені результати, приріст стійкості взірців породи у фільтратах хлоркалієвого і соленасиченого розчинів майже однакова.

Отже, за результати проведених лабораторних досліджень для підвищення стійкості стінок свердловини рекомендується для впровадження на бурових підприємствах нашої країни модифікована паливно-бітумна ванна, компонентний склад якої наводимо нижче:

– пічне побутове паливо – 89,0-93,5%;
– окислений бітум – 5-9%;
– сульфонол – 1,5-2,%.

Час витримування ванни у свердловині навпроти горизонтів, що схильні до осипань і обвалів, становить 7-8 годин.

Модифікована паливно-бітумна ванна ефективна для боротьби з обвалюваннями та осипаннями стінок свердловини всіх типів порід, а тому її можна назвати універсальною. Міцність всіх взірців породи зростає приблизно у 1,25-2,1 рази. Менший приріст міцності спостерігається у низькопроникних взірцях, а більший – у високопроникних.

Домішка сульфонолу від 1,5 до 2,0% від об'єму модифікованої паливно-бітумної ванни зменшує сили поверхневого натягу між ванною і взірцями породи, збільшує глибину проникнення ванни у стінки свердловини, протидіє проникненню фільтрату бурового розчину в пори породи, знижує інтенсивність осипань і обвалів стінок свердловини.

Література

1 Ясов В.Г. Осложнения в бурении: справочное пособие / В.Г. Ясов, М.А. Мыслюк. – М.: Недра, 1991. – 334 с.

2 Оринчак М.І. Паливно-бітумна ванна / М.І. Оринчак, А.І. Різничук, М.М. Оринчак, О.С. Бейзик // Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. – 2011. – №3(44).

3 Оринчак М.І. Модифікована гідрофобно-бітумна ванна / М.І. Оринчак, О.С. Бейзик, І.І. Чудик // Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. – 2012. – №3 (48).

4 Оринчак М.І. Рідинні ванни для запобігання осипання стінок свердловини / М.І. Оринчак, О.С. Бейзик, А.І. Васько / Тези доповідей на міжнародній науково-технічній конференції «Іноваційні технології буріння свердловин, видобування нафти і газу, та підготовки фахівців нафтогазової галузі» 2012 р. (Івано-Франківськ, 3-6 жовтня 2012 р.). – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2012 р. – 320 с.

5 Краткая химическая энциклопедия / Под редакцией Кнумянц И.Л. и др. – М.: Москва, 1963. – 1085 с.

Стаття надійшла до редакційної колегії 14.02.13
Рекомендована до друку професором ***Коцкуличем Я.С.*** *(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)*
професором ***Кожевніковим В.О.*** *(Державний ВНЗ «Національний гірничий університет», м. Дніпропетровськ)*

УДК 620.194

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОХІМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТАЛІ ТРИВАЛО ЕКСПЛУАТОВАНОГО НАФТОВОГО РЕЗЕРВУАРУ

О.І. Звірко

Фізико-механічний інститут ім. Г.В.Карпенка НАН України; 79060, м. Львів, вул. Наукова, 5; тел. (032) 2296517; e-mail: petrushchak@ipm.lviv.ua

Робота присвячена встановленню особливостей електрохімічної поведінки деградованої сталі нафтового резервуару у підтоварних водах з нафтосховищ різних нафтопереробних заводів.

Виявлено відмінність електрохімічної поведінки експлуатованої маловуглецевої сталі Ст 3сп різних ділянок нафтового резервуару у підтоварних водах з резервуарів зберігання нафти різного складу залежно від їх попереднього контакту з експлуатаційним середовищем різної агресивності. Внаслідок тривалого контакту сталі Ст 3сп нафтосховища з агресивним експлуатаційним середовищем (підтоварною або конденсованою водою) суттєво знижується її корозійна тривкість. Інтенсивність протікання електрохімічних процесів є вищою на сталі тих ділянок нафтового резервуару, які контактували в процесі експлуатації з конденсованою чи підтоварною водою, ніж тих, які контактували з нафтою. Сталь ділянок, що контактували попередньо лише з нафтою, має найбільш позитивне значення потенціалу без струму, найнижчу густину струму корозії та найвищий поляризаційний опір у досліджених підтоварних водах із різних нафтопереробних заводів. Підтоварна вода з нижчою мінералізацією є менш корозійно агресивною порівняно з високомінералізованою підтоварною водою. Понижена корозійна тривкість деградованої сталі нафтосховища зумовлена активацією корозійного процесу.

Ключові слова: деградована сталь, підтоварна вода, резервуар.

Работа посвящена установлению особенностей электрохимического поведения деградированной стали нефтяного резервуара в подтоварных водах с нефтехранилищ разных нефтеперерабатывающих заводов.

Обнаружено отличие электрохимического поведения эксплуатированной малоуглеродистой стали Ст 3сп разных участков нефтяного резервуара в подтоварных водах с хранилищ нефти разного состава в зависимости от их предварительного контакта с эксплуатационной средой разной агрессивности. Вследствие длительного контакта стали Ст 3сп нефтехранилища с агрессивной эксплуатационной средой (подтоварной или конденсированной водой) существенно снижается ее коррозионная стойкость. Интенсивность протекания электрохимических процессов выше на металле тех участков нефтяного резервуара, которые контактировали в процессе эксплуатации с конденсированной или подтоварной водой, нежели тех, что контактировали с нефтью. Сталь участков, что предварительно соприкасались только с нефтью, имеет наиболее положительное значение потенциала без тока, наиболее низкую плотность тока коррозии и наиболее высокое поляризационное сопротивление в исследованных подтоварных водах с разных нефтеперерабатывающих заводов. Подтоварная вода с более низкой минерализацией является менее коррозионно-агрессивной по сравнению с высокоминерализованной подтоварной водой. Снижение коррозионной стойкости деградированной стали нефтехранилища обусловлено активацией коррозионного процесса.

Ключевые слова: деградированная сталь, подтоварная вода, резервуар.

The work is devoted to the determination of peculiarities of electrochemical behaviour of degraded steel of oil storage tank in residual waters from the oil storage tanks of different refineries.

The difference of electrochemical behaviour of the exploited low carbon steel St3S from different zones of the oil storage tank depending on its prior contact with service environment of different aggressiveness in residual water from the oil storage tanks is detected. A conclusion is drawn, that corrosion resistant of oil storage tank steel St3S essentially decreased as a result of the long-term contact of steel with an aggressive service environment (residual or condensed water). It is shown, that the intensity of electrochemical processes on steel of those zones of oil storage tank, which contacted during the service with residual or condensed water were higher than that on the steel of those zones which contacted with oil. It is established that oil storage tank steel of zone contacted preliminarily only with oil had the most positive open circuit potential, the lowest corrosion current density and the highest polarization resistance in investigated residual waters from the oil storage tanks of different refineries. The lowly mineralized residual water was less corrosive than highly mineralized residual water. The corrosion resistance of degraded steel of the oil storage tank is reduced due to the activation of the corrosion process.

Keywords: degraded steel, drawn against commodity water, tank.

Одними з найнебезпечніших об'єктів нафтової промисловості є нафтосховища, що пов'язано зі значною кількістю відмов в резервуарних парках, в тому числі аварійних. Більшість вертикальних сталевих резервуарів експлуатуються понад проектний ресурс, що й зумовлює їх низьку надійність. Зазвичай, ресурс резервуару визначається вичерпанням його несівної здатності внаслідок циклічного навантаження, що зумовлює появу та розвиток втомних тріщин, а також корозійного зношування [1-5]. Вертикальні сталеві резервуари володіють недостатньою корозійною тривкістю, що зумовлює появу численних корозійних уражень їх внутрішньої поверхні [2, 4]. Найінтенсивніше кородує нижня частина нафтосховища під дією залишкової (підтоварної) води [6]. Значні корозійні локальні ураження спостерігаються на межі розділу фаз нафта-вода [4, 7]. Верхні пояси резервуару та покришка кородують під впливом

конденсованої вологи. Середні пояси резервуару, які контактують лише з нафтою, кородують незначно [7]. Внаслідок протікання електрохімічної корозії, зумовленої залишковою водою, можливе наводнювання сталі за її тривалої експлуатації, внаслідок чого знижується опір крихкому руйнуванню та корозійному і водневому розтріскуванню [3]. Разом зі стоншенням стінки труби та появою концентраторів напружень внаслідок корозійних уражень це знижує роботоздатність конструкції, тому для забезпечення подальшої надійної та безпечної експлуатації нафтосховищ важливо визначити тенденції до зміни електрохімічних, механічних та інших характеристик експлуатованих сталей та прогнозування на основі отриманих результатів їх залишкового ресурсу.

Метою роботи є встановлення особливостей електрохімічної поведінки деградованої сталі нафтового резервуару у підтоварних водах з нафтосховищ різних нафтопереробних заводів.

Матеріали та методи випробувань

Об'єктом досліджень була сталь Ст 3сп нафтового резервуару (PKN ORLEN S.A., Плоцьк, Польща), демонтованого після близько 30 років експлуатації. За середовищем, з яким контактувала впродовж експлуатації внутрішня поверхня конструкції, вирізняли такі характерні ділянки нафтосховища (рис. 1): 1 – верхня ділянка стінки, яка контактувала з повітрям та конденсованою водою; 2 – ділянка, яка постійно контактувала лише з нафтою; 3 і 4 – відповідно ділянка стінки біля дна резервуару та його дно, що постійно контактували лише з підтоварною водою. Для електрохімічних досліджень вирізали зразки з цих ділянок резервуару поблизу його внутрішньої поверхні (поблизу контакту металу з експлуатаційним середовищем). Досліджували циліндричні зразки діаметром 4 мм, запресовані у фторопласт (робоча поверхня – шліфований торець циліндра).



Рисунок 1 – Схема вирізання зразків з різних ділянок (1, 2, 3, 4) нафтосховища

За корозійні середовища слугували:

а) підтоварна вода з нафтосховища Плоцького нафтопереробного заводу (НПЗ) хімічного складу (мг-екв/дм^3) 79,27 Na^++K^+; 14,00 Ca^{++}; 1,25 Mg^{++}; 92,72 Cl^-; 0,48 SO_4^{--}; 0,84 HCO_3^-; 0,48 CO_3^{--} (pH6,5, мінералізація - 5495,44 мг/дм^3, загальна твердість – 15,25 мг-екв/дм^3, тимчасова твердість – 0,84 мг-екв/дм^3, окислюваність перманганатна - 28,00 мг O/дм^3);

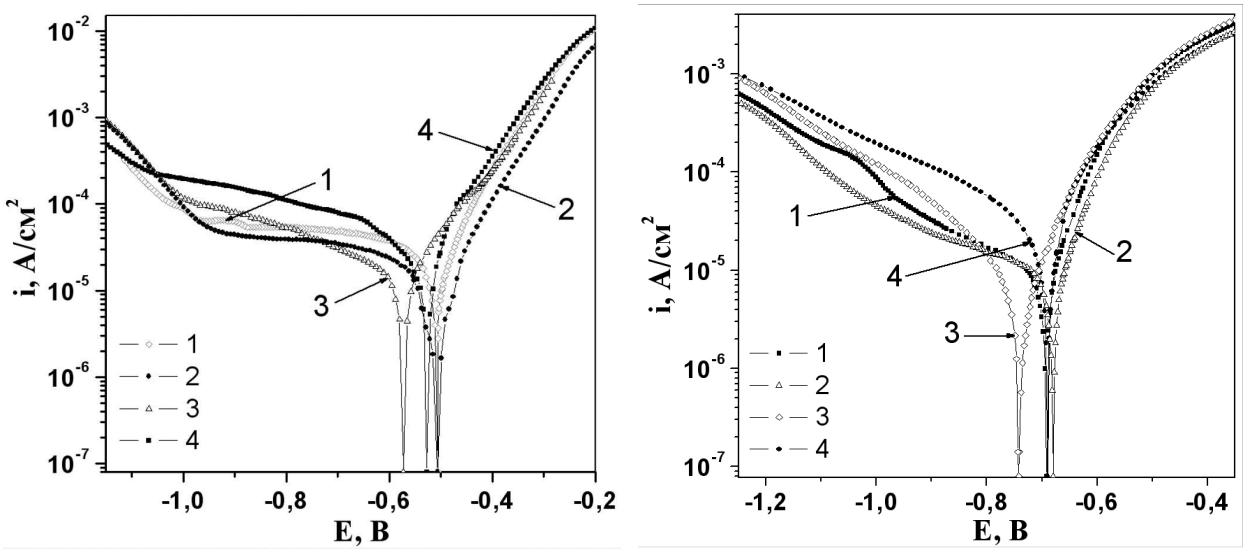
б) підтоварна вода зі сховища знесоленої нафти Надвірнянського НПЗ хімічного складу (мг-екв/дм^3) 23,38 Na^++K^+; 0,38 Ca^{++}; 0,50 Mg^{++}; 1,60 Cl^-; 8,33 SO_4^{--}; 12,60 HCO_3^-; 1,72 CO_3^{--} (pH6,7, мінералізація - 1828,36 мг/дм^3, загальна твердість - 0,88 мг-екв/дм^3, тимчасова твердість - 0,88 мг-екв/дм^3, окислюваність перманганатна - 37,00 мг O/дм^3). Температура корозійного середовища становила 20 ± 2 °С.

Електрохімічні дослідження проводили шляхом зняття потенціодинамічних поляризаційних кривих на потенціостаті IPC-Pro зі швидкістю розгортки потенціалу – 1 мВ/с, застосовуючи термостатовану трьохелектродну комірку. Електрод порівняння – насичений хлорсрібний електрод, допоміжний – платиновий. Базові електрохімічні характеристики досліджуваної сталі (потенціал без струму $E_{i=0}$, густину струму корозії i_{cor}, граничний дифузійний струм i_d, константи Тафеля $a_к$, $a_а$, $b_к$, $b_а$) визначали графічно-аналітичним методом. Поляризаційний опір R_p розраховували за рівнянням Стерна-Гірі [8]: $\Delta E/\Delta i = R_p = K/i_{cor}$, де $K = b_a \cdot b_k / [2{,}3 \cdot (b_a + b_k)]$ – константа, b_a і b_k – константи Тафеля анодної та катодної реакцій відповідно.

Результати та обговорення

Експлуатована сталь Ст 3сп нафтосховища у досліджених корозійних середовищах знаходиться в активному стані (рис. 2). Найнижчою корозійною активністю характеризується сталь Ст 3сп ділянки 2 нафтового резервуару, що свідчить про її нижчу ступінь деградації порівняно з іншими ділянками експлуатованого нафтосховища. Зокрема, інтенсивність протікання процесів відновлення (у даному випадку деполяризації кисню) на сталі Ст 3сп ділянки 2 є нижчою (нижчі значення граничних дифузійних струмів), ніж на сталі інших ділянок нафтового резервуару. Для сталі Ст 3сп ділянки 2 характерним є також вища інтенсивність протікання анодного процесу розчинення металу.

Сталь Ст 3сп різних ділянок резервуару відрізняється за своїми електрохімічними властивостями (табл. 1). Потенціал без струму сталі Ст 3сп, плавно зміщуючись у бік від'ємніших значень, стабілізується впродовж 30-40 хв. експозиції у підтоварній воді з нафтосховища Плоцького НПЗ, найшвидше встановлюється потенціал без струму металу ділянки 2 нафтосховища. У підтоварній воді зі сховища знесоленої нафти Надвірнянського НПЗ потенціал без струму сталі Ст 3сп різних ділянок резервуару встановлюється через 10-20 хв. після занурення. При цьому потенціал без струму сталі Ст 3сп ділянок 1, 3 та 4 резервуару плавно зміщується у бік від'ємніших значень, а сталі Ст 3сп ділянки 2 – спершу у бік від'ємніших, а після 2-3 хв. експозиції – додатніших значень, що свідчить про її вищу корозійну тривкість.



a) *b)*

Рисунок 2 – Потенціодинамічні поляризаційні криві (*a, b*) сталі Ст 3сп різних ділянок резервуару (1, 2, 3, 4) у підтоварній воді з нафтосховищ Плоцького (*a*) та Надвірнянського (*b*) НПЗ

Найбільш позитивне значення потенціалу без струму властиве сталі Ст 3сп ділянки 2 нафтового резервуару (-0,49 В та -0,68 В у підтоварній воді з нафтосховищ Плоцького та Надвірнянського НПЗ відповідно), а найбільш негативне значення - сталі Ст 3сп ділянки 3 (-0,57 В та -0,74 В у підтоварній воді з нафтосховищ Плоцького та Надвірнянського НПЗ відповідно).

Нахили тафелівських ділянок катодної та анодної кривої (константи Тафеля) на сталі ділянки 2 мають найвищі значення, тобто корозійний процес протікає на даній сталі з найвищим поляризаційним опором. Так, поляризаційний опір сталі ділянки 2 у підтоварній воді з нафтосховищ Плоцького та Надвірнянського НПЗ у 3,4 та 3,8 рази відповідно є вищим, ніж сталі ділянки 3. Сталь Ст 3сп ділянки 3 резервуару характеризується найнижчим значенням поляризаційного опору (0,33 Ω·м^2 та 0,55 Ω·м^2 у підтоварній воді з нафтосховищ Плоцького та Надвірнянського НПЗ відповідно). Густина струму корозії сталі ділянки 2 у підтоварній воді з нафтосховища Плоцького НПЗ становить 3,3 μА/см^2, що у 2,6 рази нижча, ніж ділянки 3.

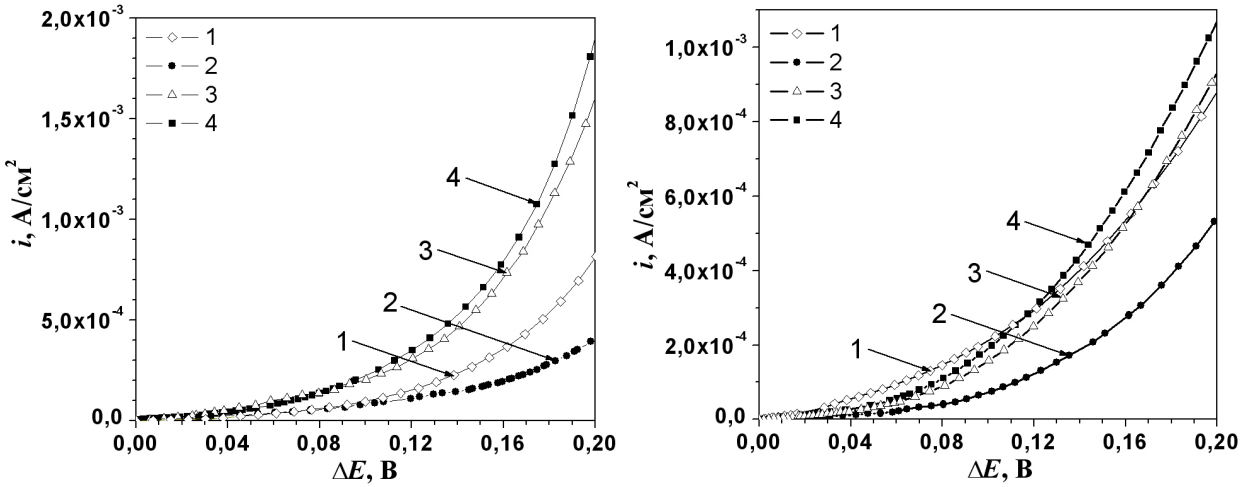
Отже, найбільш від'ємний потенціал без струму, найвища густина струму корозії та найнижчий поляризаційний опір у досліджених середовищах властиві сталі Ст 3сп ділянки 3, яка контактувала з підтоварною водою, а найвища опірність корозії властива матеріалу ділянки 2, яка контактувала з найменш агресивним середовищем – нафтою (табл. 1). Тобто, корозійна тривкість експлуатованої сталі Ст 3сп у досліджених корозивних середовищах залежить від місця вирізання зразків (метал різних поясів резервуару характеризується різним опором корозії). Так, деградована сталь Ст 3сп резервуару зберігання нафти, яка в процесі експлуатації контактувала з підтоварною водою (нижній пояс) або її конденсатом (верхній пояс) характеризується нижчою корозійною тривкістю у підтоварних водах порівняно зі сталлю середніх поясів резервуару, яка під час експлуатації контактувала лише з нафтою та найменше зазнала агресивного впливу експлуатаційного середовища.

Підтоварна вода з резервуару зберігання знесоленої нафти Надвірнянського НПЗ є менш корозійно агресивною порівняно з підтоварною водою з нафтового резервуару Плоцького НПЗ: поляризаційний опір сталі Ст 3сп ділянки 2 у першому випадку в 1,9, а ділянки 3 – в 1,7 разів вищий, ніж поляризаційний опір сталі цих ділянок у підтоварній воді з нафтосховища Плоцького НПЗ, хоч потенціал без струму сталі у підтоварній воді з нафтового резервуару Надвірнянського НПЗ є від'ємнішим. Виявлено відмінність у корозивній агресивності підтоварних вод з нафтосховищ різних НПЗ зумовлена, очевидно, присутністю у підтоварній воді з нафтого резервуару Надвірнянського НПЗ екстрагованих з нафти компонентів, які володіють інгібуючими властивостями, та її меншою мінералізацією. Отримані дані щодо електрохімічних характеристиках якісно узгоджуються з гравіметричними дослідженнями корозійної тривкості сталі Ст 3сп у цих середовищах [3, 4]. Отже, такі електрохімічні характеристики, як потенціал без струму $E_{i=0}$, густина струму корозії i_{cor}, поляризаційний опір R_p, константи Тафеля катодної та анодної реакцій $b_к$ та $b_а$ для сталі Ст 3сп з різних ділянок резервуару є чутливими до корозійної деградації металу (табл. 1).

Про вищу ступінь деградації сталі Ст 3сп ділянок резервуару, що в процесі тривалої експлуатації контактували з високоагресивним середовищем (конденсованою чи підтоварною водою) свідчить також легша активація корозійного процесу при накладенні однакової перенапруги. На рис. 3 та 4 наведено графічні залежності $\Delta E - i$, де $\Delta E = E_{pol} - E_{i=0}$, E_{pol} – по-

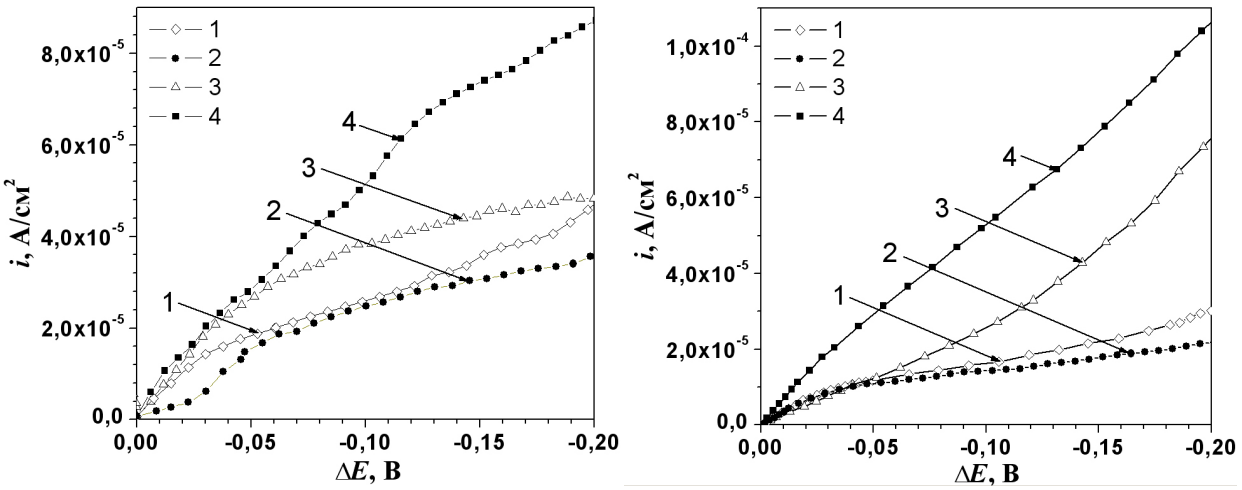
Таблиця 1 – Електрохімічні параметри сталі Ст 3сп різних ділянок резервуару у підтоварній воді із нафтосховищ Площького (чисельник) та Надвірнянського (знаменник) НПЗ

Ділянки	$-E_{i=0}$, В	i_{cor}, μА/см^2	i_d, μА/см^2	Константи Тафеля, В				R_p, Ω·м^2
				$-b_к$	$b_а$	$-a_к$	$-a_а$	
1	0,51/0,69	6,7/3,8	53,0/-	0,16/ 0,16	0,13/ 0,12	0,61/ 0,78	0,43/ 0,62	0,47/0,79
2	0,49/0,68	3,3/1,7	37,0/-	0,17/ 0,20	0,17/ 0,14	0,63/ 0,80	0,41/ 0,61	1,12/2,11
3	0,57/0,74	8,6/5,1	40,0/-	0,14/ 0,14	0,12/ 0,12	0,64/ 0,86	0,49/ 0,67	0,33/0,55
4	0,53/0,69	7,3/4,0	135,0/-	0,15/ 0,15	0,12/ 0,13	0,60/ 0,77	0,48/ 0,62	0,40/0,76



a) *b)*

Рисунок 3 – Залежність Δ*E* – *i* для сталі Ст 3сп різних ділянок резервуару (1, 2, 3, 4) у підтоварній воді з нафтосховищ Площького (*а*) та Надвірнянського (*b*) НПЗ за однакової анодної перенапруги (Δ*E* = $E_{pol} - E_{i=0}$, E_{pol} – потенціал поляризації)



a) *b)*

Рисунок 4 – Залежність Δ*E* – *i* для сталі Ст 3сп різних ділянок резервуару (1, 2, 3, 4) у підтоварній воді з нафтосховищ Площького (*а*) та Надвірнянського (*b*) НПЗ за однакової катодної перенапруги (Δ*E* = $E_{pol} - E_{i=0}$, E_{pol} – потенціал поляризації)

тенціал поляризації. Так, за однакової перенапруги найменше активується анодна реакція розчинення сталі ділянки 2, яка характеризується найвищою корозивною тривкістю. Тобто за однакової перенапруги анодної реакції сталь ділянки 2 експлуатованого нафтосховища кородує найповільніше. Активація катодних процесів при накладенні однакової перенапруги також є найнижчою на сталі ділянки 2 порівняно з експлуатованим металом інших ділянок нафтосховища.

ВИСНОВКИ

Виявлено відмінність у електрохімічній поведінці сталі Ст 3сп різних ділянок нафтового резервуару у підтоварних водах з резервуарів зберігання нафти різного складу залежно від їх попереднього контакту з експлуатаційним середовищем різної агресивності. Інтенсивність протікання електрохімічних процесів на сталі ділянок нафтового резервуару, які контактували в процесі експлуатації з конденсованою чи підтоварною водою є вищою, ніж тих, які контактували з нафтою. Сталь ділянок, що контактували попередньо лише з нафтою, має найбільш позитивне значення потенціалу без струму, найнижчу густину струму корозії та найвищий поляризаційний опір у досліджених підтоварних водах із різних нафтопереробних заводів. Підтоварна вода з нижчою мінералізацією є менш корозійно агресивною порівняно з високомінералізованою водою. Понижена корозійна тривкість деградованої сталі нафтосховища зумовлена активацією корозійного процесу.

Література

1 Крижанівський Є.І. Корозійно-воднева деградація нафтових і газових трубопроводів та її запобігання: уауково-технічний посібник / Є.І.Крижанівський, Г.М.Никифорчин ; під ред. В.В. Панасюка. У 3-х т. – Т.2: Деградація нафтопроводів та резервуарів і її запобігання. – Івано-Франківськ: Івано-Франківський нац. техн. ун-т нафти і газу, 2011. – 447с.

2 Moidek A. Wykonawstwo robót antykorozyjnych na zbiornikach magazynowych w aspekcie najnowszych uregulowań prawnych // Ochrona przed korozją, 11A, 2002. – S. 26-36.

3 Corrosion and stress corrosion cracking of exploited storage tank steel / A. Zagórski, H. Matysiak, O. Tsyrulnyk, et al. // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2004. – № 3. – С. 113-117.

4 Corrosion degradation of oil storage tank / A. Zagórski, H. Matysiak, Z. Słobodian, et al. // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2004. – Спец. вип. № 4, т. 1. – С. 437-439.

5 Захаров Н.М. Рекомендации по повышению надежности стального вертикального цилиндрического резервуара / Н.М.Захаров, Ю.А.Бахарев // Электронный научный журнал “Нефтегазовое дело”. – 2006. http://www.ogbus.ru.

6 Технологія, обладнання та матеріали протикорозійного захисту резервуарів для зберігання нафти і нафтопродуктів / Б. Лавришин, В. Піддубний, М. Волошин, Н. Путінцева // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2002. – Спец. вип. № 3, т. 2. – С. 807-811.

7 Гоник А.А. Коррозия нефтепромышленного оборудования и меры ее предупреждения / А.А.Гоник. – М.: Недра, 1976. – 189 с.

8 Шрайер Л.Л. Коррозия: Справочник / Л.Л.Шрайер. – М.: Металлургия, 1981. – 632 с.

Стаття надійшла до редакційної колегії
04.03.13
Рекомендована до друку
професором ***Івасівим В.М.***
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)
професором ***Никифорчиним Г.М.***
(Фізико-механічний інститут ім. Г.В.Карпенка НАН України, м. Львів)

УДК 622.691

ВИЗНАЧЕННЯ ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ МОДУЛЯ РУХОМОГО ТРУБОПРОВОДУ

О.М. Мандрик, Вал. В. Зайцев

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська,15, тел. (0342) 727186, 727101;
e-mail: i e f @ n u n g . e d u . u a , z v a l v 1 9 7 4 @ m a i l . r u

Описано математичну модель для визначення техніко-економічних параметрів модуля рухомого трубопроводу, який призначений для транспортування природного газу в стисненому стані та складається з рамної конструкції, розміри якої відповідають розмірам 40-футового морського контейнера і просторового змійовика. Для полегшення конструкції пропонується значну частину змійовика виготовляти у вигляді двошарової композитної конструкції, внутрішній шар якої – стандартні сталеві труби або перехідники, а зовнішній – намотаний на них склопластик. На основі створеної математичної моделі складено алгоритм і програму, які дозволили визначити техніко-економічні параметри модуля рухомого трубопроводу. Проаналізовано отримані результати стосовно Каспійського регіону.

Ключові слова: стиснутий природний газ, рухомий трубопровід, безпека, модуль, судно-носій, морське транспортування.

Описана математическая модель для определения технико-экономических параметров модуля подвижного трубопровода, предназначенного для транспортировки природного газа в сжатом состоянии , который состоит из рамной конструкции, размеры которой соответствуют размерам 40-футового морского контейнера и пространственного змеевика. Для облегчения конструкции предлагается большую часть змеевика изготавливать в виде двухслойной композитной конструкции, внутренний слой которой – стандартные стальные трубы или переходники, а внешний – намотанный стеклопластик. На основе созданной математической модели составлен алгоритм и программа, которые позволили рассчитать технико-экономические параметры модуля судового подвижного трубопровода. Выполнен анализ полученных результатов применительно к Каспийскому региону и определена сумма капиталовложений в модульный парк.

Ключевые слова: сжатый природный газ, подвижный трубопровод, безопасность, модуль, судноноситель, морская транспортировка.

The mathematical model for determining the technical and economic parameters of movable pipeline module, which is to be transported by special ships-carriers is described. The described module is designed for the transportation of natural gas in the compressed condition and consists of a frame structure, the dimensions of which correspond to the size of a 40-foot sea container and spatial coil. The analysis offer to reduce the weight of the structure most of the coil to produce a two-layer composite construction. Inner layer is in produced by standard steel pipes or adapters, while the outer layer by wound fiberglass. Based on the created mathematical model algorithm and program were compiled, which allowed us to calculate the technical and economic parameters of the ship movable pipeline module. Created analysis of the results is applied in the Caspian region and determins the amount of investment in modular park..

Keywords: compressed natural gas, movable pipeline, module, ship carrier, sea transportation.

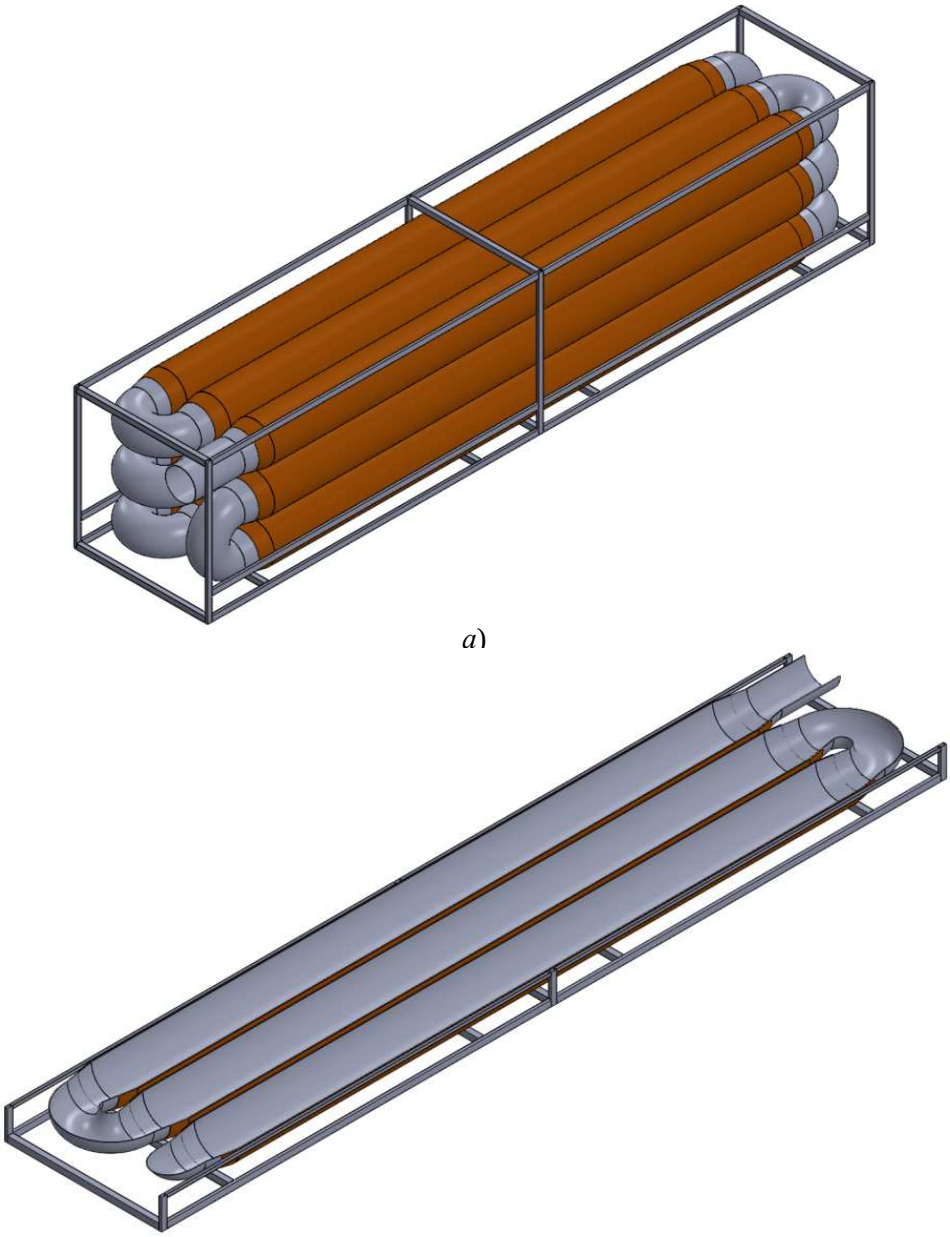
Постановка проблеми. Оскільки світова потреба у природному газі постійно зростає, газовидобувні компанії намагаються освоїти нові морські родовища природного газу і нові технології його видобування і транспортування. Зменшення собівартості всього технологічного ланцюга - від видобутку до доставки природного газу кінцевому споживачеві - є одним з головних завдань, яке ставлять перед собою ці компанії. Для вирішення вказаної проблеми перспективною вважається технологія транспортування CNG (стиснений природний газ), яка в порівнянні з LNG дає змогу за певних умов значно знизити витрати на морське транспортування природного газу.

Транспортувати газ у стисненому вигляді можна за допомогою суден-носіїв, на яких змонтовано рухомі трубопроводи. Існує декілька варіантів компоновки рухомого трубопроводу на судні-носії, одним з яких може бути модульний просторовий змійовик [1, 2] (рис. 1).

Таке компонування рухомого трубопроводу є новим, і всі його техніко-економічні показники вимагають докладного дослідження.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В роботі [3] розглянуто техніко-економічні питання транспортування стисненого природного газу за допомогою CNG-модулів, які містять в собі CNG-балони різних типів, що відрізняються за конструкцією CNG-модуля від розглянутої в статті. Пропонована конструкція модуля не містить балонів, а тому параметри досліджених в [3] модулів відрізняються від CNG-модулів з просторовим полегшеним змійовиком. Крім того, виробництво модулів з CNG-балонами 4-го типу дуже складно освоїти сучасній українській промисловості, на відміну від модулів з просторовим змійовиком.

Мета дослідження – створення математичної моделі з метою визначення техніко-економічних параметрів модуля рухомого трубопрово-



а)

б)

а – ізометрія, б – переріз по першому ярусу змійовика

Рисунок 1 – Модуль просторового змійовика рухомого трубопроводу

ду, який включає в себе полегшений сталевий просторовий змійовик.

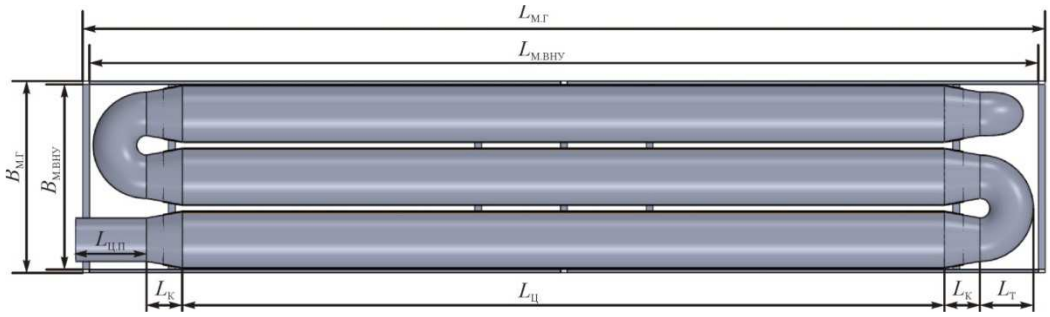
Викладення основного матеріалу. Основою для створення математичної моделі стали ескізи модуля і патенти [1, 2].

Модуль складається з рамної конструкції, розміри якої відповідають розмірам 40-футового морського контейнера та просторового змійовика (рис. 1). Для полегшення конструкції більша частина змійовика виконана у вигляді двошарової композитної конструкції. Внутрішній шар - стандартні сталеві труби або перехідники, зовнішній шар - намотаний на них склопластик (рис. 2, 3).

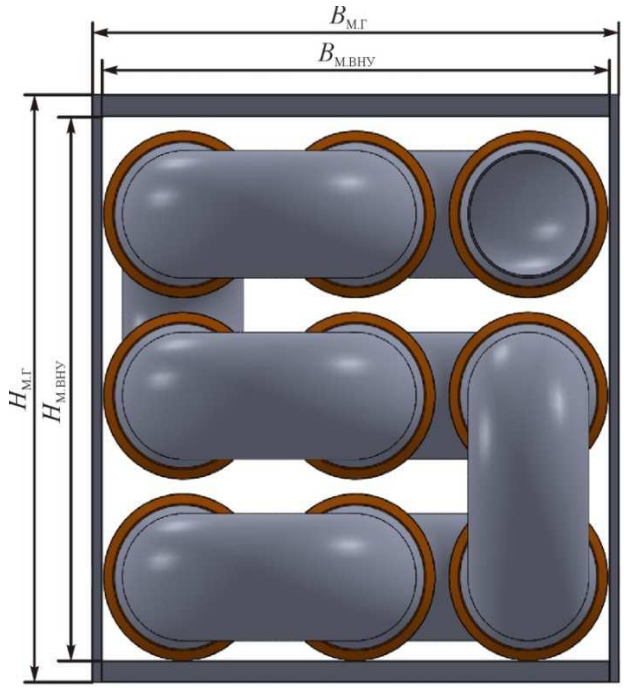
До складу змійовика входять такі елементи:

- циліндричні композитні відрізки труб (9 шт.), зовнішній діаметр сталевого шару яких 720 мм;
- конусні перехідники з частково намотаним по довжині склопластиковим шаром (18 шт.), що з'єднують між собою циліндричні відрізки і тороідальні коліна;
- тороідальні сталеві коліна (8 шт.), які об'єднують всі відрізки труб в єдиний просторовий змійовик;
- сталеві циліндричні перехідники (2 шт.), які потрібні для об'єднання модулів у блоки.

Основні техніко-економічні параметри модуля, що необхідно визначити:



а)



б)

а – вид зверху на перетин першого ярусу змійовика, б – вид справа

Рисунок 2 – Ескіз модуля

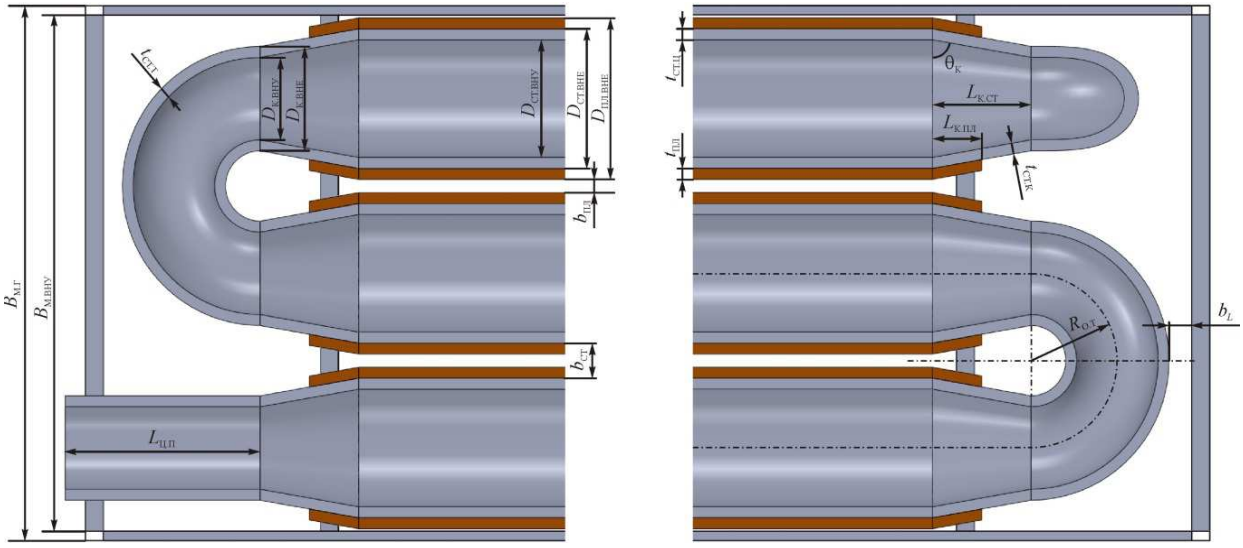


Рисунок 3 – Детальний ескіз виду зверху тороїдальних колін

– об'єм газу в змійовику за нормальних умов, $V_{\text{газ.ну}}$, м^3;

– об'єм вантажного простору в змійовику, $V_{\text{про}}$, м^3;

– маса модуля з газом, $m_{\text{м}}$, кг;

– масова досконаліть змійовика, $k_{\text{тр}}$, кг/л;

– собівартість модуля, Ц$_{\text{м}}$, USD;

– питома вартість модуля, ц$_{\text{м.л}}$, USD/л.

Виходячи з конструкції змійовика, об'єм його вантажного простору, $V_{\text{про}}$, м^3 визначається залежністю:

$$V_{\text{про}} = 9V_{\text{вну.ц}} + 18V_{\text{вну.к}} + 8V_{\text{вну.т}} + 2V_{\text{вну.п}},$$

де $V_{\text{вну.ц}}$ – об'єм простору у відрізку циліндричної труби, м^3:

$$V_{\text{вну.ц}} = \pi \frac{D^2_{\text{ст.вну}}}{4} L_{\text{ц}};$$

$D_{\text{ст.вну}}$ – внутрішній діаметр труби, м:

$$D_{\text{ст.вну}} = D_{\text{ст.вне}} - 2t_{\text{ст.ц}};$$

$D_{\text{ст.вне}}$ – зовнішній діаметр циліндричної сталевої частини труби, м;

$t_{\text{ст.ц}}$ – прийнята товщина стінки циліндричної сталевої частини труби, м;

$L_{\text{ц}}$ – довжина відрізка циліндричної частини труби, м:

$$L_{\text{ц}} = L_{\text{гр}} - 2\left(L_{\text{к}} + L_{\text{т}}\right);$$

$L_{\text{гр}}$ – довжина вантажної зони модуля, м:

$$L_{\text{гр}} = L_{\text{м.вну}} - 2b_L;$$

$L_{\text{м.вну}}$ – довжина внутрішнього простору модуля (40-футового), м;

b_L – зазор між торцевими балками модуля і трубою, м;

$L_{\text{к}}$ – довжина конічної сталевої частини труби, м:

$$L_{\text{к}} = 0{,}5\left(D_{\text{ст.вне}} - D_{\text{к.вне}}\right) \cdot tg\theta_{\text{К}};$$

$D_{\text{к.вне}}$ – зовнішній менший діаметр конічної частини труби, м;

$\theta_{\text{К}}$ – кут нахилу твірної конуса, рад;

$L_{\text{т}}$ – зовнішній радіус тороідального коліна труби, м:

$$L_{\text{т}} = R_{\text{о.т}} + 0{,}5D_{\text{к.вне}};$$

$R_{\text{о.т}}$ – радіус осьової лінії тороідального коліна труби, м:

$$R_{\text{о.т}} = \frac{D_{\text{пл.вне}} + b_{\text{пл}}}{2};$$

$D_{\text{пл.вне}}$ – зовнішній діаметр циліндричної склопластикової частини труби, м;

$$D_{\text{пл.вне}} = D_{\text{ст.вне}} + 2t_{\text{пл}};$$

$t_{\text{пл}}$ – прийнята товщина склопластикової оболонки труби, м;

$b_{\text{пл}}$ – максимальний зазор між склопластиковими оболонками труб, м:

$$b_{\text{пл}} = \frac{B_{\text{м.вну}} - 3D_{\text{пл.вне}}}{2};$$

$B_{\text{м.вну}}$ – ширина внутрішнього простору модуля (40-футового), м;

$V_{\text{вну.к}}$ – об'єм простору у конусі, м^3:

$$V_{\text{вну.к}} = \pi \frac{D^2_{\text{к.вну}} + D^2_{\text{ст.вну}}}{8} L_{\text{к}};$$

$D_{\text{к.вну}}$ – внутрішній менший діаметр конічної частини труби, м:

$$D_{\text{к.вну}} = D_{\text{к.вне}} - 2t_{\text{ст.к}};$$

$t_{\text{ст.к}}$ – товщина стінки конічної сталевої частини труби, м;

$V_{\text{вну.т}}$ – об'єм простору у коліні, м^3:

$$V_{\text{вну.т}} = \pi^2 R_{\text{о.т}} \frac{D^2_{\text{к.вну}}}{4};$$

$V_{\text{вну.п}}$ – об'єм простору у відрізку циліндричного перехідника, м^3:

$$V_{\text{вну.п}} = \pi \frac{D^2_{\text{к.вну}}}{4} L_{\text{ц.п}};$$

$L_{\text{ц.п}}$ – довжина одного циліндричного перехідника між модулями, м:

$$L_{\text{ц.п}} = L_{\text{м.вну}} - b_L - L_{\text{т}} - 2L_{\text{к}} - L_{\text{ц}} + 0{,}5\left(L_{\text{м.г}} - L_{\text{м.вну}}\right) + 0{,}1,$$

$L_{\text{м.г}}$ – габаритна довжина модуля (40-футового), м.

Всі товщини оболонок змійовика визначаються на основі розрахунків міцності.

Обсяг газу у змійовику при н.у, $V_{\text{газ.ну}}$, м^3:

$$V_{\text{газ.ну}} = V_{\text{про}} k_{\text{расш}},$$

де $k_{\text{расш}}$ – коефіцієнт розширення газу:

$$k_{\text{расш}} = \frac{\rho_{\text{газ}}\left(P_{\text{раб}}, t_{\text{раб}}\right)}{\rho_{\text{газ}}\left(P_{\text{н.у}}, t_{\text{н.у}}\right)};$$

$P_{\text{н.у}} = 101325$ Па;

$t_{\text{н.у}} = 15^0 C$;

$P_{\text{раб}}$ – робочий тиск у трубі, Па;

$t_{\text{раб}}$ – температура природного газу у змійовику;

$\rho_{\text{газ}}(P,t)$ – функція, що описує залежність густини природного газу від тиску і температури, кг/м^3.

Функція, що описує залежність густини природного газу від тиску і температури створена на основі фізичних властивостей метану. Враховуючи те, що залежність густини метану від тиску і температури не відповідає властивостям ідеального газу, необхідно використовувати результати експериментальних досліджень властивостей метану, які, наприклад, детально викладені Н.Б. Варгафтіком у [4].

Відповідно до [4] залежності густин метану, $\rho_{\text{мет}}$, кг/м^3, від температури, T, °К, і тиску p, МПа, у діапазоні, який нас цікавить представлені в табл. 1.

На основі даних, наведених у табл. 1, розроблено алгоритм і програму, які дають змогу для заданих температури і тиску метану, визна-

Таблиця 1 – Густина метану

		T, °K									
		180	190	200	220	240	260	280	300	320	340
p, МПа	0,1	1,081	1,023	0,971	0,881	0,807	0,744	0,691	0,644	0,604	0,568
	0,2	2,181	2,061	1,954	1,771	1,620	1,493	1,384	1,291	1,209	1,137
	0,3	3,301	3,115	2,506	2,669	2,438	2,245	2,081	1,939	1,816	1,708
	0,4	4,442	4,186	3,959	3,577	3,264	3,002	2,781	2,591	2,425	2,279
	0,5	5,605	5,274	4,983	4,492	4,093	3,764	3,483	3,244	3,035	2,852
	1,0	11,79	11,00	10,32	9,217	8,347	7,634	7,047	6,545	6,112	5,734
	1,4	17,28	15,97	14,89	13,18	11,87	10,82	9,960	9,225	8,598	8,065
	2,0	26,79	24,30	22,36	19,47	17,36	15,73	14,41	13,31	12,39	11,59
	3,0	49,14	41,68	37,04	31,08	27,17	24,32	22,10	20,31	18,82	17,55
	4,0	283,0	68,97	56,27	44,46	37,91	33,47	30,16	27,54	25,41	23,62
	5,0	293,4	230,4	85,54	60,28	49,73	43,20	38,55	35,00	32,15	29,80
	6,0	301,0	259,7	154,2	79,43	62,77	53,56	47,33	42,68	39,03	36,06
	7,0	307,3	272,8	217,6	103,0	77,22	64,56	56,43	50,56	46,04	42,41
	8,0	312,6	282,2	239,9	131,0	93,02	76,16	65,88	58,65	53,16	48,83
	9,0	317,2	289,7	253,6	159,9	110,0	88,26	75,59	66,89	60,39	55,31
	10	321,2	295,9	263,8	184,4	127,6	100,8	85,54	75,24	67,66	61,80
	15	337,2	317,7	296,5	247,6	199,7	161,5	135,3	117,3	104,2	94,25
	20	348,8	332,2	313,9	276,6	239,6	205,6	177,4	155,4	138,4	125,1
	30	365,9	352,4	338,0	309,9	282,7	256,7	232,6	211,1	192,3	176,3
	40	378,6	366,7	354,2	330,9	308,4	286,6	266,1	247,0	229,6	213,8

чити густину метану. Програма інтерполює табличні дані за допомогою кубічних сплайнів.

Залежність густини метану від температури і тиску у графічному вигляді зображена на рис. 4 і 5.

Маса модуля з газом, $m_м$, кг:

$$m_м = m_{об} + m_{тр.бр},$$

де $m_{об}$ – маса рамної оболонки модуля, кг;

$m_{тр.бр}$ – маса змійовика з газом, кг:

$$m_{тр.бр} = m_{газ} + m_{ст} + m_{пл};$$

$m_{газ}$ – маса газу у змійовику, кг:

$$m_{газ} = V_{про}\rho_{газ};$$

$m_{ст}$ – маса сталі у змійовику, кг;

$m_{пл}$ – маса склопластику у змійовику, кг.

Маса сталі у змійовику, кг:

$$m_{ст} = V_{ст}\rho_{ст},$$

де $\rho_{ст}$ – густина сталевої частини труби, кг/м^3;

$V_{ст}$ – об'єм сталі у змійовику, м^3:

$$V_{ст} = 9V_{ст.ц} + 18V_{ст.к} + 8V_{ст.т} + 2V_{ст.п};$$

$V_{ст.ц}$ – об'єм сталі у відрізку циліндричної труби, м^3:

$$V_{ст.ц} = \pi\frac{D^2_{ст.вне}}{4}L_ц - V_{вну.ц};$$

$V_{ст.к}$ – об'єм сталі у конусі, м^3:

$$V_{ст.к} = \pi\frac{D^2_{к.вне} + D^2_{ст.вне}}{8}L_к - V_{вну.к};$$

$V_{ст.т}$ – об'єм сталі у коліні, м^3:

$$V_{ст.т} = \pi^2 R_{о.т}\frac{D^2_{к.вне}}{4} - V_{вну.т};$$

$V_{ст.п}$ – об'єм сталі у відрізку циліндричного перехідника, м^3:

$$V_{ст.п} = \pi\frac{D^2_{к.вне}}{4}L_{ц.п} - V_{вну.п}.$$

Маса склопластику у змійовику, кг:

$$m_{пл} = V_{пл}\rho_{пл},$$

де $\rho_{пл}$ – густина склопластикової оболонки труби, кг/м^3;

$V_{пл}$ – об'єм склопластику у змійовику, м^3:

$$V_{пл} = 9V_{пл.ц} + 18V_{пл.к};$$

$V_{пл.ц}$ – об'єм пластика у відрізку циліндричної труби, м^3:

$$V_{пл.ц} = \pi\frac{D^2_{пл.вне} - D^2_{ст.вне}}{4}L_ц;$$

$V_{пл.к}$ – об'єм пластика у конусі, м^3:

$$V_{пл.к} = \pi L_{к.пл}\frac{D^2_{пл.вне} + 4D_{пл.вне}t_{пл} - D^2_{ст.вне} - 4t^2_{пл}}{8};$$

$L_{к.пл}$ – довжина конічної склопластикової частини труби, м;

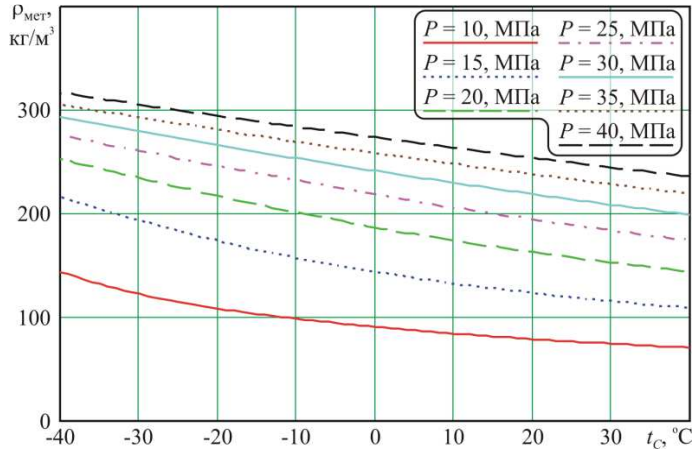


Рисунок 4 – Залежність густини метану від його температури за тиску від 10 до 40 МПа

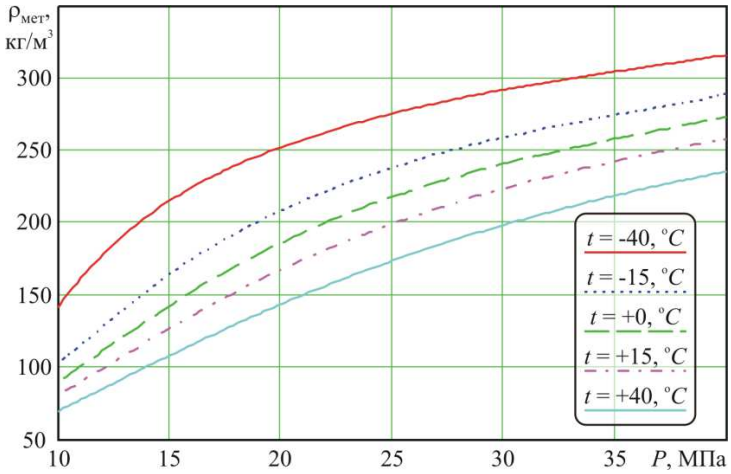


Рисунок 5 – Залежність густини метану від його тиску за температури від - 40 ^{o}C до +40 ^{o}C

$D_{\text{пл.вне.к}}$ – зовнішній менший діаметр кінічної склопластикової частини труби, м:

$$D_{\text{пл.вне.к}} = D_{\text{пл.вне}} - \left(D_{\text{пл.вне}} - \left(D_{\text{к.вне}} + 2t_{\text{пл}}\right)\right)\frac{L_{\text{к.пл}}}{L_{\text{к}}};$$

$L_{\text{к.пл}}$ – довжина конічної склопластикової частини труби, м.

Масова досконаліть змійовика, $k_{\text{тр}}$, кг/л:

$$k_{\text{тр}} = \frac{m_{\text{ст}} + m_{\text{пл}}}{V_{\text{про}}1000}.$$

Собівартість модуля, Ц$_{\text{м}}$, USD:

$$\text{Ц}_{\text{м}} = \left(\text{Ц}_{\text{об}} + \text{Ц}_{\text{ст}} + \text{Ц}_{\text{пл}}\right)k_{\text{раб}},$$

де $k_{\text{раб}} = 1{,}35$ – коефіцієнт, що враховує вартість зварювальних і монтажних робіт;

Ц$_{\text{об}}$ – вартість рамної оболонки модуля, USD:

$$\text{Ц}_{\text{об}} = m_{\text{об}}\text{ц}_{\text{кг}};$$

ц$_{\text{кг}}$ – вартість 1 кг виробу рамної оболонки модуля, USD/кг;

Ц$_{\text{ст}}$ – вартість сталевої частини змійовика, USD:

$$\text{Ц}_{\text{ст}} = \text{ц}_{\text{ст}}m_{\text{ст}};$$

ц$_{\text{ст}}$ – питома вартість металу труби, USD/кг;

Ц$_{\text{пл}}$ – вартість склопластику змійовика, USD:

$$\text{Ц}_{\text{пл}} = \text{ц}_{\text{пл}}m_{\text{пл}};$$

ц$_{\text{пл}}$ – питома вартість склопластику у складі труби, USD/кг.

Питома вартість модуля, ц$_{\text{м.л}}$, USD/л:

$$\text{ц}_{\text{м.л}} = \frac{\text{Ц}_{\text{м}}}{V_{\text{про}}1000}.$$

На основі представленої вище математичної моделі було створено алгоритм і програму, які дають змогу визначити техніко-економічні параметри модуля рухомого трубопроводу.

Для вихідних даних (табл. 2) отримані параметри модуля рухомого трубопроводу, що зведені до табл. 3.

Експлуатація рухомих трубопроводів на Каспійському морі обмежена застосуванням для цих цілей суден-носіїв водотоннажністю до 70000 тонн. Для таких суден орієнтовно місткість – 1250 модулів, швидкість ходу – 20 вузлів. Відстань між портами завантаження і вивантаження складе не більше 200 км (108 миль).

Обсяг газу, що транспортується при нормальних умовах на такому судні за один рейс:

Таблиця 2 – Вихідні дані тестового розрахунку

Найменування величини	Позначення величини	Числове значення
Межа плинності використовуваної сталі, МПа (матеріал сталевої частини труби - 30ХГСА)	$\sigma_т$	830
Межа витривалості використовуваної сталі, МПа	$\sigma_в$	1080
Робочий тиск у трубі, атм	$P_{раб}$	200
Габаритна довжина модуля, м	$L_{м.г}$	12,19
Довжина внутрішнього простору модуля, м	$L_{м.вну}$	12,032
Габаритна ширина модуля, м	$B_{м.г}$	2,44
Ширина внутрішнього простору модуля, м	$B_{м.вну}$	2,352
Габаритна висота модуля, м	$H_{м.г}$	2,59
Висота внутрішнього простору модуля, м	$H_{м.вну}$	2,40
Густина сталевої частини труби, кг/м^3	$\rho_{ст}$	7700
Густина склопластикової оболонки труби, кг/м^3	$\rho_{пл}$	2000
Зовнішній діаметр циліндричної сталевої частини труби, м	$D_{ст.вне}$	0,720
Маса рамної оболонки модуля, кг	$m_{об}$	1200
Вартість 1 кг виробу рамної оболонки модуля, USD/кг	$ц_{кг}$	1,35
Питома вартість металу труби, USD/кг	$ц_{ст}$	2,5
Питома вартість склопластику труби, USD/кг	$ц_{пл}$	10
Зазор між торцевими балками модуля і трубою, м	b_L	0,10
Кут нахилу твірної конуса, градуси	$\theta_К$	80
Зовнішній менший діаметр конічної частини труби, м	$D_{к.вне}$	0,56
Довжина конічної склопластикової частини труби, м	$L_{к.пл}$	0,227

Таблиця 3 – Техніко-економічні параметри модуля рухомого трубопроводу

Найменування величини	Позначення величини	Числове значення
Товщина стінки циліндричної сталевої частини труби, мм	$t_{ст.ц}$	8
Товщина склопластикової оболонки труби, мм	$t_{пл}$	8
Густина газу у трубі, кг/м^3	$\rho_{газ}$	167,72
Об'єм вантажного простору у змійовику, м^3	$V_{про}$	38,83
Маса газу у змійовику, кг	$m_{газ}$	6510
Маса стали у змійовику, кг	$m_{ст}$	14140
Маса склопластику у змійовику, кг	$m_{пл}$	3290
Маса змійовика з газом, кг	$m_{тр.бр}$	23940
Маса модуля з газом, кг	$m_м$	25140
Масова досконаліть змійовика, кг/л	$k_{тр}$	0,45
Об'єм газу у трубі при н.у., м^3;	$V_{газ.ну}$	9705
Вартість модуля, USD	$Ц_м$	94300
Питома вартість модуля, USD/л	$ц_{м.л}$	2,43

$$V_{1Р} = Ц_м N_м = 9705 \cdot 1250 = 12{,}1 \cdot 10^6 \text{ м}^3.$$

Тривалість вантажних операцій завантаження і розвантаження може скласти по 15 годин, і, відповідно, час кругового рейсу:

$$t_{К.Р} = \frac{\frac{108 \cdot 2}{20} + 15 + 15}{24} = 1{,}7 \text{ діб.}$$

Отже, річна транспортувальна здатність такого судна-носія:

$$V_Г = V_{1Р} \frac{T}{t_{К.Р}} = 12{,}1 \cdot 10^6 \frac{360}{1{,}7} = 2{,}56 \cdot 10^9 \text{ м}^3,$$

де $T = 360$ – тривалість річного експлуатаційного періоду судна, діб.

Україна має квоту на Каспійський газ – 5 млрд. м^3/рік. Кількість суден-носіїв для транспортування річного обсягу газу:

$$n_С = \frac{V_{max}}{V_Г} = \frac{5 \cdot 10^9}{2{,}56 \cdot 10^9} = 1{,}95.$$

Отже, для транспортування 5 млрд. м3 на рік достатньо мати 2 судна-носія місткістю по 1250 модулів кожен.

Капіталовкладення у модульний парк складуть:

$$K_{\text{м}} = n_{\text{С}} N_{\text{м}} \text{Ц}_{\text{м}} = 2 \cdot 1250 \cdot 94{,}3 \cdot 10^3 = $$

$$= 235{,}75 \cdot 10^6 \text{ USD}.$$

Висновки

1. Отримано аналітичні залежності, які уможливили створення математичної моделі визначення техніко-економічних параметрів модуля рухомого трубопроводу із полегшеним просторовим змійовиком.

2. На основі створеної математичної моделі обчислено техніко-економічні параметри модуля рухомого трубопроводу.

3. Проаналізовано отримані результати стосовно Каспійського регіону.

Література

1 Деклараційний патент на корисну модель № 67664 Україна, МПК F17C 5/00. Спосіб транспортування стиснутого природного газу рухомим трубопроводом [Текст] / Патон Б.Є., Крижанівський Є.І., Савицький М.М., Швидкий Е.А., Зайцев В.В., Мандрик О.М.; заявник і патентотримач Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. – № u201114580; заявл. 08.12.11; опубл. 27.02.12 // Промислова власність. – 2012. – Бюл. № 4.

2 Деклараційний патент на корисну модель № 67658 Україна, МПК B63B 25/00. Баржа-пліт для транспортування стиснутого природного газу [Текст] / Патон Б.Є., Крижанівський Є.І., Савицький М.М., П'ятничко О.І., Зайцев В.В., Мандрик О.М.; заявник і патентотримач Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. - № u201113979; заявл. 28.11.11; опубл. 27.02.12 // Промислова власність. – 2012. – Бюл. № 4.

3 Крижанівський Є.І. Концепція альтернативного постачання природного газу до України [Текст] / Є.І. Крижанівський, Вал. В. Зайцев // Зб. наук. праць ІФНТУНГ "Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2010. – № 4 (37). – С. 5–15.

4 Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. Изд. 2-е, дополненное и перераб [Текст] / Н.Б. Варгафтик. – М.: Наука, 1972. – 720 с.

Стаття надійшла до редакційної колегії 28.02.13
Рекомендована до друку професором ***Семчуком Я.М.*** *(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ) професором* ***Савицьким М.М.*** *(Інститут електрозварювання ім. Є.О.Патона НАН України, м. Київ)*

УДК 622.24.058

РОЗРОБЛЕННЯ ЗАХОДІВ ЩОДО ЕФЕКТИВНОГО ВИКОРИСТАННЯ ПОПУТНОГО НАФТОВОГО ГАЗУ СВЕРДЛОВИН МИКУЛИЧИНСЬКОГО РОДОВИЩА

А.П. Джус, І.Б. Галюк, В.В. Борківський, М.О. Боян

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська,15,
e-mail: andriy_dzhus@i.ua

Розглядається актуальна науково-практична задача, що полягає у вирішенні проблем, які виникають під час експлуатації Микуличинського родовища через необхідність транспортування газорідинної суміші до установки комплексної підготовки нафти на значну відстань гористою місцевістю. Вирішення цієї задачі досягається шляхом виділення попутного нафтового газу із газорідинного потоку за мінімальних втрат тиску потоком рідини і з максимально можливою якістю відсепарованого газу та подальшого його використання з врахуванням потреб регіону відповідно до запропонованої схеми.

Запропоновано варіанти конструкцій резервуарів високого тиску з вмістимістю відповідною до споживання і комплектацією, що забезпечує можливість їх під'єднання до споживачів, зокрема віддалених об'єктів туристичної сфери та індивідуальних господарств з невеликими обсягами споживання.

Доведено економічну доцільність запропонованого способу постачання попутного нафтового газу та встановлено необхідність вибору параметрів резервуарів високого тиску з врахуванням потреб споживачів та аналізу витратної складової з обов'язковим моментом оптимізації витрат.

Ключові слова: газорідинна суміш, попутний нафтовий газ, сепарація, резервуари високого тиску, обсяги споживання.

Рассматривается актуальная научно-практическая задача, которая заключается в решении проблем, возникающих при эксплуатации Микуличинского месторождения из-за необходимости транспортировки газожидкостной смеси к установке комплексной подготовки нефти на значительное расстояние по гористой местности. Решение этой задачи достигается путем выделения попутного нефтяного газа с газожидкостного потока при минимальных потерях давления потоком жидкости и с максимально возможным качеством отсепарированного газа и дальнейшего его использования с учетом потребностей региона в соответствии с предложенной схемой.

Предложены варианты конструкций резервуаров высокого давления с вместимостью, соответсвующей потреблению, и комплектацией, обеспечивающей возможность их подключения к потребителям, в частности удаленных объектов туристической сферы и индивидуальных хозяйств с небольшими объемами потребления.

Доказана экономическая целесообразность предлагаемого способа доставки попутного нефтяного газа и установлена необходимость выбора параметров резервуаров высокого давления с учетом потребностей потребителей и анализа затратной составляющей с обязательным моментом оптимизации расходов.

Ключевые слова: газожидкостная смесь, попутный нефтяной газ, сепарация, резервуары высокого давления, объемы потребления.

Considered the relevant scientific and practical task concerning the solution of problems that arise in drilling in the Mykulychyn field because of the necessity to transport gas-liquid mixture to the facilities of complex oil processing over a considerable distance through mountain areas. The solution to this problem is achieved by removing the associated petroleum gas from the gas-liquid flow with minimal spending of pressure by liquid flow and the best possible quality of separated gas and the further use of it considering the needs of the region in accordance with the proposed scheme.

We suggest the variants of constructions high pressure reservoirs with the capacity corresponding consumption and package which enable them connection to consumers in particular remote sites of tourism industry and individual households with small amounts of consumption.

We prove the economic feasibility of the proposed method of delivery of associated petroleum gas and a requirement the necessity pressure vessels to the needs of consumers and cost analysis with mandatory cost optimization.

Keywords: gas-liquid mixture, associated petroleum gas, separation, pressure vessels, the volume of consumption.

Вступ

Проблема використання попутного нафтового газу (ПНГ), що вилучається з надр у процесі видобування нафти, добре відома. В окремих країнах значна його частина спалюється, а газові факели є невід'ємним атрибутом більшої частини нафтових родовищ. На нафтових родовищах нашої країни, зокрема тих, що перебувають на пізніх стадіях експлуатації, дуже часто зустрічаються випадки втрати значної частини летких вуглеводнів на різних етапах збору та підготовки продукції свердловин. Згідно з прогнозами експертів, у найближче десятиліття основним напрямком розвитку енергетики буде не стільки альтернативна енергетика, скільки більш ефективне та інтенсивне використання мінеральних енергоресурсів, насамперед - газу. Це повною мірою стосується і ПНГ. За своїм складом і властивостями ПНГ не поступається природному газу. Майже дві третини припадає

на метан (CH_4), ідентичний як природному газу земних надр, так і біогазу, одержуваного з відходів сільськогосподарського виробництва. ПНГ, як і інші види газу, може в повному обсязі використовуватися в енергетиці та нафтохімії.

Вилучення з покладу пластової нафти на поверхню здійснюється через систему видобувних свердловин. Разом з нафтою із надр видобуваються значні обсяги пластової води (як витісняючий агент), попутний нафтовий газ, тверді частинки механічних домішок (гірські породи, затверділий цемент), тому свердловинна продукція нафтових родовищ завжди є складною багатофазною багатокомпонентною дисперсною системою. Промислове облаштування родовищ вимагає залучення значного обсягу капітальних вкладень, значна частка яких припадає на спорудження систем збору і транспортування продукції свердловин. Система збору і підготовки нафти включає комплекс промислових технічних засобів і установок, з'єднаних трубопроводами. Зазвичай на родовищах застосовується напірна герметизована система збору і підготовки продукції свердловин, яка майже повністю виключає втрати вуглеводнів. Єдиної універсальної системи збору нафти, газу і води не існує, так як кожне родовище має свої особливості: розміри, форму, рельєф місцевості, природно-кліматичні умови, мережу свердловин, обсяги нафти, газу і води, фізико-хімічні властивості пластових рідин та інші. Намагаючись уникнути або мінімізувати втрати ПНГ, нафтогазовидобувні підприємства часто стикаються з проблемою транспортування газорідинних сумішей. Особливо гостро ці питання постають на родовищах, зосереджених в гірських районах. Прикладом може слугувати Микуличинське родивище, що експлуатується нафтогазовидобувним управлінням "Надвірнанафтогаз".

Особливості експлуатації Микуличинського родовища зумовили необхідність зниження устьових тисків з метою підтримання обсягів видобутку нафти та газу на оптимальному рівні. Зниження устьових тисків досягнуто шляхом спорудження додаткового об'єкта – нафтосепараційного пункту (НСП) "Микуличин". Відповідно до існуючої схеми в межах сепараційної установки НСП "Микуличин" здійснюється збір продукції свердловин, розділення її на рідку і газоподібну фази та додаткове очищення останньої. Подальше транспортування газу та нафти реалізується завдяки використанню гвинтового компресора та поршневого насоса відповідно. Звичайний режим роботи НСП передбачає подальше сумісне транспортування газу і нафти. Кількість нафти, що транспортується трубопроводом, може змінюватися у зв'язку із періодичним відвантаженням її в автоцистерни. Середня ж продуктивність родовища складає: по газу –близько 30 тис. $м^3$/добу, а по нафті – 65 т/добу. Значний вплив на транспортування трубопроводом утворюваної суміші мають сезонні зміни. Із пониженням температури у зимовий період значно зростає в'язкість нафти, що призводить до періодичного зростання тиску в трубопроводі до значень, що відповідають максимуму потужності компресорної установки. Загалом, у різні пори року для забезпечення можливості роботи компресорної установки в оптимальному режимі кількість рідини, що подається в трубопровід регулюється шляхом відвантаження певної частки рідкої фази у автоцистерни. Однак у зимовий період, зважаючи на розміщення НСП в гірській місцевості на висоті близько 1000 м над рівнем моря, вивіз рідкої фази супроводжується значними труднощами. Зважаючи на це, проблема транспортування продукції свердловин Микуличинського родовища, які характеризуються високим газовим фактором, до установки комплексної підготовки нафти є не повністю вирішеною, що обумовлює актуальність досліджень в цьому напрямку.

Аналіз досліджень і публікацій з проблеми

За результатами аналізу існуючих схем збору та підготовки продукції свердловин з високим газовим фактором необхідно відмітити, що одним із способів вирішення проблеми є зменшення вмісту газу в газорідинному потоці шляхом його сепарації з оптимальним використанням відсепарованого ПНГ.

Сепарація газу від нафти відбувається при зниженні тиску нижче тиску насичення. Цей процес розпочинається в пластових умовах і продовжується під час руху газу стовбуром свердловини, збірними і промисловими трубопроводами, в апаратах підготовки свердловинної продукції. Виділений газ переміщується в бік зниженого тиску. Основними режимними параметрами процесу сепарації є тиск і температура, регулюванням яких можна створити умови для більш повного відокремлення газу від нафти. Сепарацію нафти здійснюють, як правило, в декілька ступенів. Нафтогазову суміш зі свердловин сепарують спочатку за високого тиску на першій ступені сепарації (виділяється основна маса газу), відтак нафта надходить на сепарацію за середнього і низького тисків, де вона остаточно дегазується. Вибір оптимальних умов сепарації визначається набором критеріїв, які спрямовані на реалізацію цілей процесу:

- мінімальна кількість газоподібних вуглеводнів у нафті;
- максимальний вихід нафти з суміші;
- максимальний вміст пропан-бутанових (C_3-C_4) фракцій у виділеному газі сепарації.

Перелік необхідного обладнання в кожному із випадків залежить від кількості та складу продукції свердловин [1]. У випадку неорнорідності потоку суміші, що надходить у сепаратор, часто вдаються до використання депульсатора. Використання горизонтального нафтогазосепаратора у поєднанні із депульсатором сприяє максимальному виділенню газу з газорідинного потоку. Проте якість газу, що виділяється при цьому, може бути незадовільною для подальшого використання потенційними

споживачами. З метою забезпечення належної якості газу необхідним є використання високоефективних газосепараторів.

Відсепарований газ, стиснений до 20 МПа, може використовуватися як моторне паливо. Він має низку важливих переваг порівняно з бензиновим і дизельним і цілий набір екологічних переваг. На сьогодні відсепарований газ є найчистішим альтернативним паливом для транспортних засобів. Досить сказати, що у вихлопних газах двигуна, котрий працює на газі, маса канцерогенів у 10, а іноді й у 100 разів менша, аніж в інших видах палива. Запровадження нових норм викиду в Європі незабаром призведе до заміни існуючого парку машин екологічно чистими транспортними засобами. Застосування стисненого природного газу як палива для транспортних засобів, автомобілів, промислових підприємств і т.д. відомо вже багато років і поширене в багатьох країнах світу. Наприклад, в Аргентині, Бразилії та Індії серед інших експлуатують мільйони автомобілів, що працюють на стисненому природному газі. У великих містах існують газопроводи, що постачають газозаправні станції, кожна з яких має компресор для підвищення тиску до 20 МПа. Для постачання віддалених об'єктів, природний газ зазвичай транспортують від газопроводу до заправних станцій в резервуарах високого тиску.

Свого часу нестача коштів на будівництво газопроводів, а також несплата за поставлений газопроводами природний газ в країнах тодішньої СНД ініціювали розроблення і реалізацію, так званого, автономного (безтрубного) способу газопостачання населених пунктів і промислових об'єктів. Суть автономного способу газопостачання полягає в тому, що природний газ в стисненому вигляді постачається споживачам автотранспортними засобами.

Вперше безтрубний спосіб газопостачання населеного пункту був розроблений, запроектований і реалізований в 1992 р. при газифікації села Рисове (86 будинків), (Красноперекопський район Кримської області) [2]. Природний газ в стисненому до 25 МПа вигляді постачався в населений пункт пересувним автогазозаправником ПАГЗ-2500 від автомобільної газонаповнювальної компресорної станції (АГНКС-500), що знаходилася в м. Сімферополі, на відстані 100 км. Згідно тогочасних розрахунків і досвіду експлуатації наведеного комплексу, застосування автономного газопостачання об'єктів даним способом було доцільним за наявності АГНКС, розташованої в радіусі до 100 км від газифікованого об'єкта [3]. Даний спосіб автономного газопостачання скорочував капіталовкладення і терміни введення газифікованих об'єктів у 2-5 разів, при віддаленості об'єкта від магістрального газопроводу на 10-100 км.

На перспективі, за необхідності переведення населених пунктів або промислових об'єктів на газопостачання від магістральних газопроводів (відводів), мережі низького тиску об'єктів, газифікованих від автономних газобалонних установок, є готовими для прийому магістрального газу. Газопроводи відразу завантажуються на проектну потужність, а вивільнені газобалонні установки можуть передаватися на інші об'єкти. Крім вказаних вище переваг істотним чинником є підвищення ступеня завантаження автомобільних газонаповнювальних компресорних станцій.

Постановка завдання

Зважаючи на розташування Микуличинського родовища в межах регіону, де швидко розвивається туристична галузь, використання ПНГ як енергоносіїв для транспортних засобів і для об'єктів туристичних комплексів сприятиме покращенню екологічної ситуації.

Розвиток туристичної галузі зумовлює збільшення споживання газу в населених пунктах з газовими мережами. Обсяги споживання поступово перевищують проектні, чим обумовлюють потребу у реконструкції мереж, а, отже, і спорудженні нових ділянок трубопроводу. Зважаючи на геологічні умови регіону, собівартість спорудження трубопроводів є значно більшою за її середні значення, оскільки під час проектування газопроводів необхідно враховувати характеристики ґрунтів, можливість їх сповзання та руйнування внаслідок повеней. У випадку газифікації значних за площею негустонаселених пунктів значно зростає протяжність підвідних ділянок, що є нерентабельним. Це вимагає пошуку альтернативних джерел енергії, або відкидає розв'язання існуючих проблем на невизначений час.

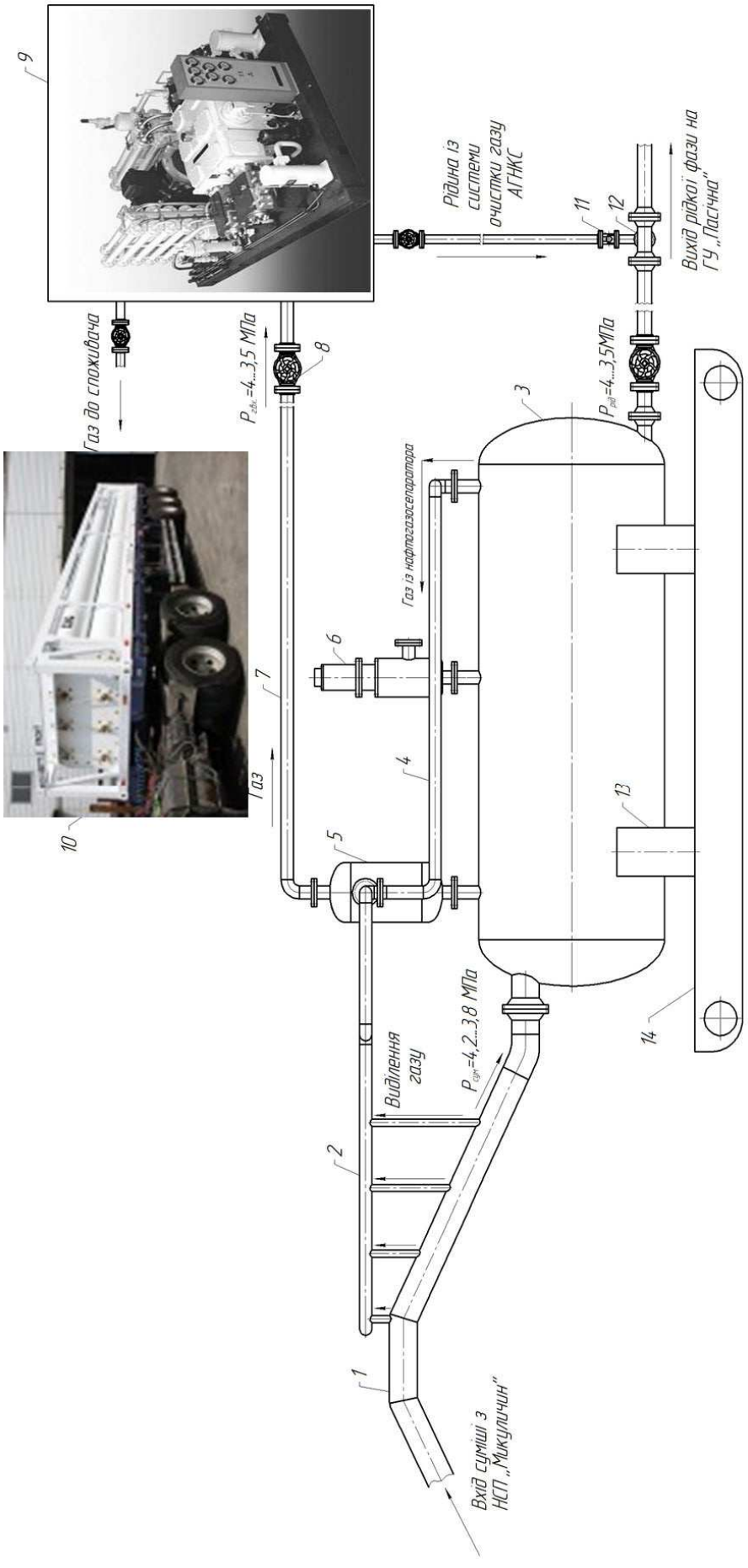
Таким чином, вирішення проблем, що виникають у ході експлуатації Микуличинського родовища, вимагає комплексного підходу, а саме:

- забезпечення виділення ПНГ із газорідинного потоку за мінімальних втрат тиску потоком рідини і з максимальною якістю відсепарованого газу;
- пошуку споживачів та шляхів транспортування газу з врахуванням особливостей розвитку регіону.

Виклад основного матеріалу

Шляхом використання горизонтального нафтогазосепаратора з депульсатором та високоефективного газосепаратора в складі сепараційного блоку, виготовленого відповідно до розробленої схеми, реалізується можливість забезпечення виділення ПНГ із газорідинного потоку за мінімальних втрат тиску потоком рідини і з належною якістю відсепарованого газу. Розміщенням сепараційного блоку на ділянці трубопрода, близькій до автомобільної дороги, створюється можливість реалізації запропонованого за результатами аналізу існуючих на сьогоднішній день технологій способу використання ПНГ згідно схеми, наведеної на рисунку 1.

Відповідно до схеми ПНГ, виділений із потоку газорідинної суміші з допомогою розробленого сепараційного блоку, надходить на АГНКС блокового виконання. На АГНКС газ завантажується в автономний пересувний резервуар високого тиску довільної конструкції. При цьому зберігається можливість періодичного



1 – депульсатор; 2 – колектор газовий; 3 – нафтогазосепаратор; 4 – трубопровід газовий від нафтогазосепаратора; 5 – сепаратор газовий; 6 – запобіжний клапан; 7 – газовий трубопровід до АГНКС; 8 – засувка; 9 – АГНКС; 10 – резервуари високого тиску для транспортування газу; 11 – зворотний клапан; 12 – трійник; 13 – опора нафтогазосепаратора; 14 – монтажна рама

Рисунок 1 – Схема використання попутного нафтового газу



Рисунок 2 – Загальний вигляд контейнерів з циліндричними резервуарами

Таблиця 1 – Технічна характеристика контейнерів фірми NK CO LTD Korea

Модель	Газ / капацитет	Кількість і довжина резервуарів	Ємність контейнера (в літрах води)	Робочий тиск, МПа	Вага одного резервуара, кг	Загальна вага, кг
TT08-2250	CNG /4536 м³	8 /10,98 м	18000	20	2780	25490
TT11-2250	CNG /6188 м³	11 / 10,98 м	24750	20	2780	33720
TT08-1045	CNG /2480 м³	8 / 5,50 м	8360	25	1430	13590
TT12-1045	CNG /3720 м³	12 / 5,50 м	12540	25	1430	19930
TT08-2240	CNG /5344 м³	8 / 10,98 м	17920	25	2830	25490
TT10-2240	CNG /6650 м³	10 / 10,98 м	22400	25	2830	31440
TT11-2240	CNG /7315 м³	11 / 10,98 м	24640	25	2830	34270

наповнення балонів автомобільних транспортних засобів. Пересувні резервуари високого тиску, що випускаються на даний час можуть бути використані для постачання газу населеним пунктам з наявною газовою мережею. Прикладом такого використання може бути населений пункт с. Ворохта. Зважаючи на вже згадувані причини, с. Ворохта потребує збільшення об'ємів постачання газу, але через обмежену пропускну здатність підвідної ділянки газопроводу ця проблема є невирішеною. Для її розв'язання з використанням пересувних резервуарів високого тиску необхідним є спорудження тільки пунктів зниження тиску та під'єднання їх до газової мережі населеного пункту.

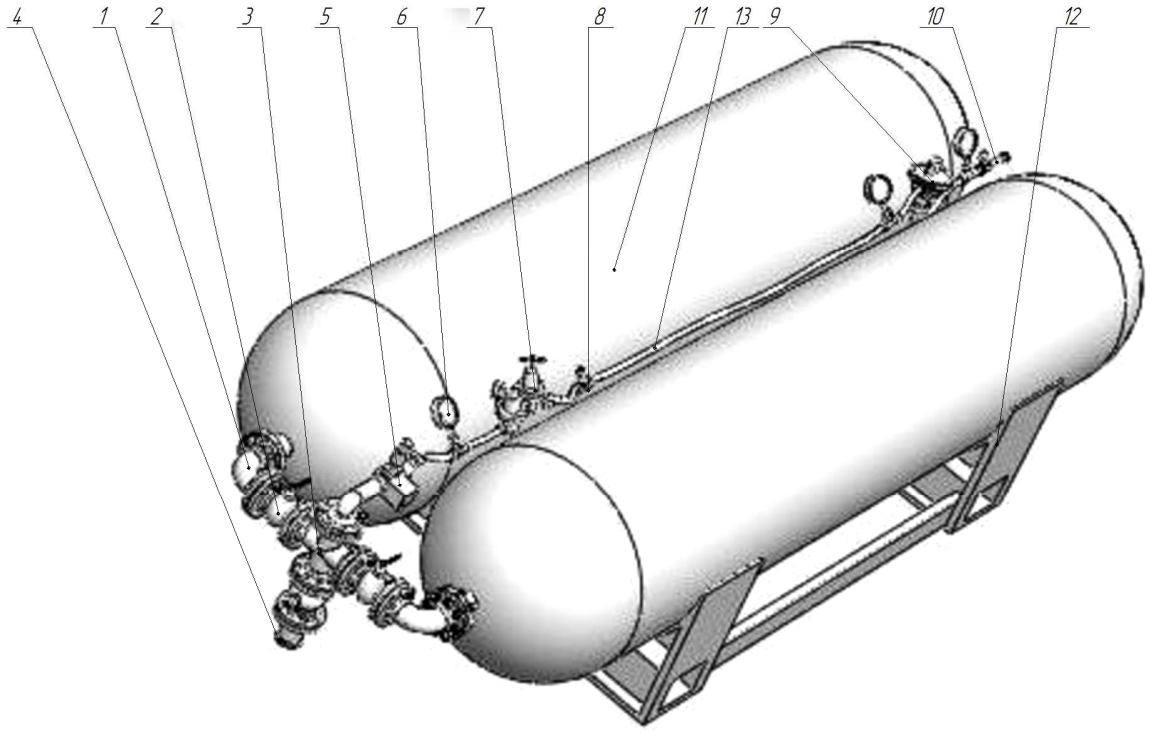
На сьогоднішній день резервуари високого тиску випускають у вигляді контейнерів, в яких монтується декілька циліндричних елементів. Циліндричні елементи, розраховані на тиск 20 і 25 МПа, зв'язують в один модуль (контейнер), що робить їх придатними до транспортування великої кількості газу на одному транспортному засобі. Контейнери можуть виготовлятися як 20-футові, так і 40-футові, що дає можливість використовувати їх для постачання газу метану різним споживачам, в тому числі таким, як школи, громадські будівлі, промислові цехи. Одним із виробників контейнерів для перевезення компримованого природного газу, що відповідають вимогам стандарту ISO 11120 є корейська фірма NK CO LTD Korea. Загальний вигляд таких контейнерів зображено на рисунку 2, а їх технічна характеристика – у таблиці 1.

Для віддалених об'єктів туристичної сфери та індивідуальних господарств необхідним є розроблення резервуарів високого тиску з ємністю, що відповідає об'єму споживання, і комплектацією, що забезпечує можливість їх під'єднання до споживача.

Загалом категорії "найменших" споживачів газу поділяються за кількістю газу спожитого за рік, рівною 2500 м^3. Для таких споживачів з наведеного в таблиці 1 переліку обладнання прийнятним є тільки варіант з ємністю 2480 м^3. Однак, затрати на придбання вказаних контейнерів будуть дуже суттєвими у порівнянні із спроможністю споживачів згаданих категорій. У разі закупівлі цих контейнерів підприємством, що реалізує газ, частка амортизаційних відрахувань становитиме значну частину вартості газу.

Для постачання газу аналогічним споживачам нами розроблено конструкцію пересувних резервуарів високого тиску, укомплектованих необхідним обладнанням для реалізації процесів завантаження, транспортування, зберігання та споживання газу власниками будинків та індивідуальних господарств.

Власниками пересувних резервуарів можуть бути як безпосередньо споживачі, так нафтогазовидобувне управління, що є власником і продавцем енергоносія. Для забезпечення потреб споживачів різних категорій пересувні ре-



1 – коліно; 2 – пристрій запірний; 3 – хрестовина; 4 – патрубок приєднувальний; 5 – клапан скидний; 6 – манометр; 7 – редуктор високого тиску; 8 – кран ; 9 – редуктор низького тиску; 10 – патрубок приєднання споживача; 11 – резервуар високого тиску; 12 – рама; 13 – трубопровід з'єднувальний

Рисунок 3 – Схема облаштування резервуарів високого тиску допоміжним обладнанням

зервуари можуть виготовлятися різних об'ємів. Але в будь-якому випадку обладнання, яким комплектуються резервуари, повинно гарантувати швидке і надійне з'єднання із заправним пунктом АГНКС, унеможливлювати викиди газу при аварійній зупинці процесу завантаження і забезпечувати можливість використання будь-ким із споживачів. Саме з таких міркувань пересувні резервури комплектуються обладнанням для двоступінчастого пониження тиску, аварійного скидання та контролю стану газу (рис. 3). Резервуари не комплектуються колісною базою. Їх переміщення передбачається здійснювати з допомогою транспортних засобів типу "евакуатор". Для завантаження і розвантаження в рамі виконано чотири квадратні отвори для встановлення спеціальних гвинтових підіймачів. У такий спосіб досягається зменшення вартості комплектів резервуарів високого тиску, а їх параметри визначаються параметрами транспортних засобів та потребами споживачів.

Зберігання природного газу під високим тиском має свої особливості. При високих тисках метан стискається більше, ніж при помірних. Цією властивістю володіють реальні гази. З рівняння стану реального газу маса газу, що знаходиться в резервуарі високого тиску, визначається як

$$m = \rho \cdot V = \frac{p}{zRT} V , \qquad (1)$$

де ρ – густина газу, що знаходиться в резервуарі;

V – об'єм резервуара;

p – тиск газу в резервуарі;

z – коефіцієнт стисливості газу;

R – газова стала;

T – температура газу в резервуарі.

Як видно із наведеного виразу, чим менший коефіцієнт стисливості, тим більшу кількість газу можна закачати в резервуар. Коефіцієнт стисливості для метану за температури 0 °С і тиску 15 МПа дорівнює 0,75. З відхиленням тиску від 15 МПа у бік зменшення або збільшення коефіцієнт стисливості зростає, тому найбільш вигідними умовами зберігання метану в резервуарах високого тиску є діапазон від 12 до 18 МПа. Водночас на значення коефіцієнта стисливості впливає і температура газу. Так, зі збільшенням температури газу на 10 °С коефіцієнт стисливості є аналогічним збільшенню тиску до 18 МПа. При розміщенні резервуарів високого тиску на відкритій місцевості протягом опалювального сезону температура газу відповідатиме температурі навколишнього середовища і не перевищуватиме 10 °С. Тому наповнення резервуарів в цей період необхідно здійснювати з врахуванням вказаної температури.

Для встановлення оптимальних параметрів резервуарів високого тиску нами розглянуто варіанти їх виготовлення із безшовних труб діаметрами 720 та 530 мм з товщинами стінок із

Таблиця 2 – Характеристика резервуарів високого тиску

Діаметр циліндричної поверхні, мм	Границя плинності матеріалу, МПа	Товщина стінки, мм	Ємність (в літрах води)	Робочий тиск, МПа	Маса одного резервуара, кг	Об'єм газу приведений до нормальних умов, м^3	Питома металоємність, кг/м^3
720	600	12	1256	10	710,6	143,5	4,95
720	700	10	1256	10	611,1	143,5	4,26
530	600	10	654	10	446,3	74,7	5,98
530	700	10	654	10	446,3	74,7	5,98
720	600	17,5	1256	15	1060,3	232,3	4,56
720	700	16	1256	15	971,1	232,3	4,18
530	600	13	654	15	577,4	120,9	4,78
530	700	11	654	15	490,2	120,9	4,05
720	600	23	1256	20	1384,7	301,8	4,59
720	700	20	1256	20	1208,3	301,8	4,00
530	600	17,5	654	20	771,4	157,1	4,91
530	700	16	654	20	707,1	157,1	4,50

стандартного ряду. При цьому було взято до уваги варіанти об'єднання двох або трьох резервуарів діаметром 720 мм і трьох або п'яти – діаметром 530 мм.

Відповідно до рекомендацій, наведених вище, розглядались варіанти виконання резервуарів з допустимим тиском 10, 15 та 20 МПа. Для визначення дійсного значення кількості газу в резервуарах при різних тисках використано залежність коефіцієнта стисливості Z від тиску [4] за умов не перевищення температури газу 10 °С. За вказаних умов коефіцієнти стисливості відповідно становлять $Z^{10} = 0{,}82$; $Z^{15} = 0{,}76$; $Z^{20} = 0{,}78$.

При визначенні параметрів резервуарів високого тиску, а саме необхідної товщини їх стінки [5], розглядались варіанти їх виготовлення із сталі з границею плинності $\sigma_T = 600$ МПа та $\sigma_T = 700$ МПа. Коефіцієнт запасу міцності приймався рівним $n = 2$. За розрахунковими значеннями товщин стінок підбирались найближчі більші із стандартного ряду.

Для вибору оптимальних параметрів резервуарів виготовлених із безшовних труб стандартного ряду та відповідних їм сферичних днищ загальною довжиною 3,5 м нами використано показник питомої металоємності, тобто відношення маси резервуара до об'єму газу, що може транспортуватися в ньому за вказаних вище умов. Інформація, отримана за результатами проведених обчислень, зведена до таблиці 2. Значення питомої металоємності за різних тисків та діаметрів циліндричної частини при загальній довжині резервуарів 3,5 м зображено на діаграмі (рис. 4).

Аналізуючи отримані результати, необхідно відмітити, що майже постійною і відносно низькою є питома металоємність резервуарів високого тиску, виготовлених із безшовних труб діаметром 720 мм за границі плинності матеріалу $\sigma_T = 700$ МПа. Найбільш ефективними є варіанти виконання резервуарів із труб діаметром 720 мм з допустимим тиском 20 МПа та труб діаметром 530 мм з допустимим тиском 15 МПа. З врахуванням отриманих результатів розглянуто декілька варіантів комплектування блоків резервуарами оптимальної конструкції. Параметри блоків наведені в таблиці 3. Загальна маса блоків резервуарів, укомплектованих додатковим обладнанням, може збільшуватися на 10-15 % і залежить від кількості використаних балонів.

Отже, з допомогою розробленого обладнання може бути реалізоване автономне постачання газу споживачам з обсягами споживання до 900 м^3 на місяць шляхом одного завантаження. При цьому транспортування обладнання здійснюватиметься автотранспортом вантажопідйомністю до 4000 кг.

Розрахунок економічної ефективності запропонованого варіанту газопостачання віддалених пунктів ускладнюється фактом зростання вартості ПНГ, що постачається, у порівнянні із вартістю газу, який постачається газопроводом. Однак, в даному випадку, беручи до уваги умови постачання, а саме:

- віддаленість пунктів споживання;
- територіальна розкиданість об'єктів споживання;
- різні обсяги споживання газу окремими об'єктами споживання та ін.,

– можна провести оцінку шляхом порівняння основних капітальних витрат для можливих варіантів газопостачання. Для цього доцільно порівняти окремі показники з точки зору

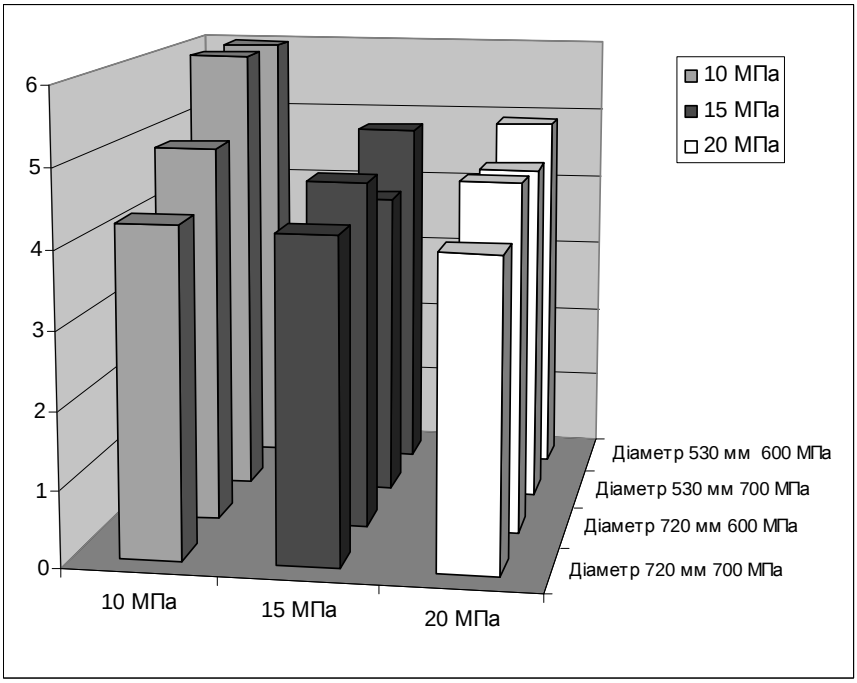


Рисунок 4 – Питома металоємність резервуарів високого тиску

Таблиця 3 – Характеристика блоків резервуарів високого тиску

Діаметр циліндричної поверхні, мм	Границя плинності матеріалу, МПа	Кількість резервуарів у блоці	Маса одного резервуара, кг	Робочий тиск, МПа	Маса облоку резервуарів, кг	Об'єм газу в балоні приведений до нормальних умов, м^3	Сумарний об'єм газу приведений до нормальних умов, м^3
720	700	2	1208,3	20	2416,6	301,8	603,6
720	700	3	1208,3	20	3624,9	301,8	905,4
530	700	3	490,2	15	1470,6	120,9	362.7
530	700	5	490,2	15	2451	120,9	604.5
530	700	3	707,1	20	2121,3	157,1	471,3
530	700	5	707,1	20	3535,5	157,1	785,5

переваг кожного з них. Вартість прокладання 1 км газопроводу із врахуванням умов гірської місцевості коливається на сьогоднішній день в межах 2,3 -2,8 млн.грн.

Запропонований в даній роботі варіант газопостачання вимагає додаткових капітальних вкладень на закупівлю сепараторів, АГНКС блокового виконання; транспортних засобів та резервуарів високого тиску.

Згідно з Російською газовою енциклопедією обґрунтування різних способів газопостачання населеного пункту у гірській місцевості, із врахуванням кількості і якості технічних засобів для кожного з варіантів, містить наступні відносні показники (табл. 4).

Навіть наближений розрахунок необхідних капіталовкладень доводить очевидну перевагу використання запропонованого варіанту постачання ПНГ.

Таблиця 4 – Показники витратного механізму для різних варіантів газопостачання віддалених гірських населених пунктів (у % до вартості газопроводу)

Статті витрат	Варіанти газопостачання	
	газопровід	постачання ПНГ
Капіталовкладення	100	43
Експлуатаційні витрати	100	85
Приведені витрати	100	90
Обслуговуючий персонал	100	10

Для оцінки переваг запропонованого способу постачання ПНГ слід чітко розмежувати споживацьку аудиторію на:

- крупних споживачів газу, такі як заклади туристичного обслуговування (900-4000 м^3/міс. у зимовий період та 200-500 м^3/міс. у літній період),

- дрібних споживачів газу, такі як індивідуальні господарства, обсяги споживання яких є відносно невеликі (300-500 м^3/міс. у зимовий період та 50-100 м^3/міс. у літній період).

Для забезпечення даних категорій споживачів ПНГ пропонується використання таких технічних засобів та способів постачання. Для крупних споживачів доцільно використовувати вище згадані контейнери з циліндричними резервуарами, ємність яких коливається від 2480 м^3 до 7315 м^3, а їх застосування дозволяє одноразово забезпечити потребу в газі на 1-4 місяці у холодний період та 4-10 місяців у теплий. Таким чином, загальна кількість постачань становитиме в середньому 2-5 на рік і залежатиме від моделі використовуваного контейнера. Для дрібних споживачів прийнятним є варіант використання розроблених резервуарів високого тиску, модельний ряд яких забезпечує одноразове постачання газу обсягом від 362,7 до 905,4 м^3 газу. За таких умов разове постачання забезпечуватиме потреби в газі на 1-3 місяці в холодний період та 3-9 місяців – у теплий. Загальна кількість постачань одного об'єкта споживання становитиме 4-10 на рік.

Капіталовкладення передбачають витрату коштів на необхідну кількість контейнерів та резервуарів високого тиску, розрахунок окупності яких залежить від обсягів споживання газу. В даному випадку слід взяти до уваги той факт, що відпускна ціна газу в межах НГВУ «Надвірнанафтогаз» становить 250 грн./тис.м^3 при споживчому тарифі на газ близько 1000 грн./тис.м^3 та 4720 грн/тис.м^3 для підприємств сфери бізнесу, до якої відносяться і заклади туристичного обслуговування.

За даних умов реалізація газу споживчій сфері існуючим тарифом та бізнес сфері за тарифом, який може коливатись в межах 2000-2500 грн/тис.м^3 є економічно доцільною та виправданою, оскільки в межах різниці відпускної ціни на газ та реалізаційним тарифом на неї є можливість забезпечення окупності капіталовкладень, про які йшла мова раніше. Однак, знову ж таки слід наголосити на можливості нормативного терміну окупності капіталовкладень тільки за умови забезпечення масового споживання ПНГ при оптимальній системі організації постачання.

Окупність окремого варіанту постачання ПНГ можна продемонструвати на прикладі. Готельний комплекс з пропозицією 80-100 ліжко-місць споживає в середньому 4000 м^3/місяць у холодний період та 600 м^3/місяць у теплий період. Таким чином, сумарне споживання газу за рік становить близько 27600 м^3. Із врахуванням різниці відпускної ціни та реалізаційного тарифу на рік грошовий обсяг коштів, направлений на окупність (за мінусом поточних витрат на обслуговування), становитиме близько 55000 грн. Таким чином, капіталовкладення на контейнер окупляться на 5-6 рік використання. Чим більший заклад туристичного обслуговування і, відповідно, більший обсяг використання газу, тим менший період окупності контейнера.

Щодо дрібних споживачів ПНГ, то до уваги слід брати і фактор транспортних витрат, які супроводжують процес постачання. Сума транспортних витрат на 1 м^3 газу, що перевозиться, може бути розрахована наступним чином:

$$B_{тр} = \frac{S \times (W_{пер}^{завант} + W_{пер}^{холост})}{V}, \qquad (2)$$

де $B_{тр}$ – сума транспортних витрат на 1 м^3 газу, грн.;

S – відстань перевезення пересувних резервуарів від АГНКС до пункту споживання, км;

$W_{пер}^{завант}$ – транспортний тариф для завантаженого транспорту, грн./км;

$W_{пер}^{холост}$ – транспортний тариф при «холостому» пробігу транспорту, грн./км;

V – сумарний об'єм газу, який перевозиться транспортним засобом за один рейс, м^3.

Транспортний тариф обирається відповідно до ситуації використання власного чи орендованого транспорту і включає: витрати на паливо, амортизацію, поточний ремонт та обслуговування транспортного засобу, заробітну плату водіїв, накладні витрати, а у випадку оренди вантажівки – ще й прибуток фірми-орендодавця.

Як приклад розглянемо варіант транспортування газу до споживача з середнім річним обсягом споживання 2600 м^3. Обраний варіант резервуарів високого тиску із діаметром циліндрової поверхні 720 мм, границею плинності 700 МПа, робочим тиском 20 МПа, кількістю резервуарів у блоці 3, відповідно масою блоку резервуарів 3624,9 кг із сумарним об'ємом газу, приведеним до нормальних умов, 905,4 м^3. Вибір такого типу обладнання дозволяє обмежити кількість поставок до 3 в рік. При використанні стандартного транспортного засобу вантажопідйомністю до 4000 кг (з можливістю перевезення 1 блоку резервуарів), обсяг споживання палива для якого становить 13,3 л/100 км, транспортний тариф коливатиметься від 2,6 до 3,5 грн/км. Прийнявши для розрахунку середнє значення транспортного тарифу 3,1 грн/км, а відстань від АГНКС до об'єкту споживання НПГ 30 км, сума транспортних витрат при постачанні газу становитиме 0,21 грн./м^3

Оптимізація витратного механізму постачання ПНГ може бути досягнута шляхом використання власного транспорту нафтогазовидобувного управління з метою його довантаження, удосконалення існуючих конструкцій автомобільного транспорту або пошук аналогів, які забезпечують більшу вантажопідйомність. Такий варіант дозволить частково змінити маятниковий маршрут перевезень на кільцевий. Внаслідок цього частка постійних витрат у транспортному тарифі зменшиться, що в підсумку забезпечить зменшення частки транспортних витрат у собівартості поставленого ПНГ.

Висновки

За результатами проведених досліджень з врахуванням існуючих проектів облаштування систем збору і підготовки продукції свердловин та їх особливостей згідно умов Микуличинського родовища запропоновано шляхи вирішення проблем транспортування продукції свердловин, які характеризуються високим газовим фактором, до установки комплексної підготовки нафти. Цього досягається шляхом виділення ПНГ із газоріднинного потоку при мінімальних втратах тиску потоком рідини і з максимально можливою якістю відсепарованого газу та подальшого його використанняв з врахуванням потреб регіону відповідно до запропонованої схеми і з допомогою розробленого обладнання.

Також потрібно зробити висновок про економічну доцільність запропонованого способу постачання ПНГ. При цьому вибір параметрів резервуарів високого тиску необхідно здійснювати з врахуванням потреб споживачів та аналізу витратної складової з обов'язковим моментом оптимізації витрат. Для забезпечення високої ефективності запропонованих проектних рішень робота у даному напрямку потребує подальших досліджень, напрацювань та практичних розрахунків, які дозволять отримати достовірну їх оцінку.

Проте, на даному етапі можна стверджувати, що постачання газу згідно запропонованої схеми та з допомогою розробленого обладнання споживачам різних категорій за цінами, існуючими на сьогоднішній день в нашій державі, характеризуватиметься високою економічною ефективністю при реалізації проекту безпосередньо нафтогазовидобувним управлінням.

Література

1 Сваровская Н.А. Подготовка, транспорт и хранение скважинной продукции: [учебное пособие] / Н.А. Сваровская. – Издательство ТПУ Томск, 2004. – 268 с.

2 Рачевский Б. С. Сжатый газ для сельских объектов / Б. С. Рачевский, И. И. Шишкин // Газовая промышленность. – 1993. – №11. – С. 34-35.

3 Рачевский Б.С. Целесообразность газификации сельских населенных пунктов сжатым природным газом от АГНКС / Б. С. Рачевский // Материалы научно-технического совета РАО "Газпром". Проблемы развития использования природного газа на транспорте. – М., 1996. – С. 54-58.

4 Гімер Р.Ф. Основи газової динаміки: [навчальний посібник] / Р.Ф. Гімер, П.Р. Гімер. – Івано-Франківськ: Факел, 2000. – 228 с.

5 Феодосьев В.И. Сопротивление материалов / В.И. Феодосьев // Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука», 1972. – 544 с.

Стаття надійшла до редакційної колегії 06.03.13
Рекомендована до друку професором ***Грудзом В.Я.*** *(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)*
професором ***Зоценком М.Л.*** *(Полтавський національний технічний університет ім.. Ю.Кондратюка, м. Полтава)*

УДК 621.438:622

ПЛАНУВАННЯ КОНТРОЛЬНО-ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ЗАХОДІВ ІЗ УРАХУВАННЯМ СПЕЦИФІКИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЛІНІЙНОЇ ЧАСТИНИ МАГІСТРАЛЬНИХ ГАЗОПРОВОДІВ

І. І. Остапюк

Товариство з обмеженою відповідальністю «Інжинірингова компанія «Машекспорт»;
04655, м. Київ, Кудрявський узвіз, 7, e-mail: Ostapiuk.Igor@ik-me.com

Проведено аналіз стану та причин зниження ефективності, безпеки і надано рекомендації стосовно шляхів їх підвищення з використанням сучасного технологічного, екологічного обладнання і проведення попереджувальних заходів. В теоретичному плані вирішується двопараметрична задача оптимізації періодичності контрольних перевірок і обслуговування газопроводів з використанням методу математичного моделювання, що само по собі має велике практичне значення у ході експлуатації магістральних газопроводів.

Ключові слова: магістральний газопровід, математична модель, контрольно-відновлювальні заходи, профілактика, ремонт.

Проведен анализ состояния и причин снижения эффективности, безопасности и предоставлены рекомендации относительно пути их повышения с использованием современного технологического, экологического оборудования и проведения предупредительных мероприятий. В теоретическом плане решается двухпараметрическая задача оптимизации периодичности контрольных проверок и обслуживания газопроводов с использованием метода математического моделирования, что само по себе имеет большое практическое значение при эксплуатации магистральных газопроводов.

Ключевые слова: магистральный газопровод, математическая модель, контрольно-восстановительные мероприятия, профилактика, ремонт.

The condition and causes which lead to declention of efficiency, safety are analyze. The ways of improvement with the use of modern technology, environmental technology and services are provided. In theory, the two-parameter optimization problem is solved by the frequency control checks and maintenance of gas pipelines with the use of mathematical modeling, which in itself is of great practical importance in gas pipelines.

Keywords: gas pipeline, a mathematical model, control and reduction procedures, prevention and repair.

В умовах старіння магістральних газопроводів набуває актуальності проблема забезпечення надійності функціонування газотранспортної системи з метою безперебійного постачання і зниження втрат газу, запобігання виникненню аварій і забрудненню навколишнього середовища. Причому проблеми безпеки та екологічності магістрального транспортування газу вимагає особливої уваги з огляду на можливі катастрофічні наслідки аварій і несправностей.

Старіння газопроводів, що є причиною великого числа аварій і пошкоджень на лінійній частині, серйозно ускладнюють процес технічної експлуатації об'єктів газотранспортної системи, збільшують матеріальні витрати.

Аналіз стану магістральних газопроводів на основі ретроспективної інформації про аварії та пошкодження на лінійній частині свідчить про значні резерви підвищення експлуатаційної надійності газотранспортної системи. Ситуація на магістральних газопроводах характеризується високою інтенсивністю аварій за останні 5 років (0.53 випадків на рік на тисячу км). Спостерігається тривожна тенденція щодо збільшення числа пошкоджень і несправностей на магістральних газопроводах (6.5-7.0 випадків на рік на тисячу км).

Певною мірою забезпечити надійність транзитного транспортування газу системою трансукраїнських газопроводів повинна мережа підземних сховищ газу (ПСГ), яка в разі виникнення аварії здатна прийняти надлишок газу і забезпечити постачання споживачам. Тому під час планування та оптимізації процесу обслуговування газотранспортної системи ПСГ повинні розглядатися як один з її елементів.

У нових умовах господарювання існує досить важливий економічний аспект цієї проблеми, оскільки аварії та пошкодження на лінійної частини газопроводу призводять до великих втрат газу, збитку від недопоставки палива, вимагають витрат на ремонтно-відновлювальні роботи.

Як відомо, методи підвищення надійності газопровідних систем поділяються на доексплуатаційні (схемні і конструктивні) та експлуатаційні [1]. Впливати на надійність функціонуючого газопроводу можна, лише забезпечивши правильну технічну його експлуатацію. Експлуатація, крім безпосереднього використання основного і допоміжного технологічного обладнання для виконання виробничих завдань з транспортування газу, включає в себе також систему технічного обслуговування і ремонту, що є сукупністю взаємопов'язаних засобів, документації технічного обслуговування і ремонту, виконавців, необхідних для підтримки і відновлення якості об'єктів і її елементів.

Враховуючи той факт, що аварійність магістральних газопроводів залишається досить високою, а темпи їх "старіння" значно випере-

джають темпи виконання капітального ремонту, одним з головних засобів підтримки експлуатаційної надійності лінійної частини є система технічного обслуговування і ремонту.

Методи і підходи до вирішення перерахованих завдань базуються на результатах основоположних досліджень провідних вчених галузі В.Л. Березіна, П.П. Бородавкіна, Л.Г. Тєлєгіна, Н.Х. Халлієва, Е.М. Ясіна, К.Е. Рашепкіна, З.Г. Галіулліна, А.Ф. Комягіна та ін.

Водночас, аналіз досвіду експлуатації газотранспортних систем і наукових досліджень у цій області свідчить про необхідність подальшого опрацювання завдань вдосконалення організації експлуатаційного обслуговування лінійної частини та її елементів.

З позицій системного аналізу система технічного обслуговування і ремонту характеризується певним складом, структурою і режимом функціонування [2]. В залежності від умов експлуатації ремонтно-експлуатаційні підрозділи мають різну потужність і структуру, ступінь централізації і концентрації матеріально-технічних та інших ресурсів.

Необхідно визнати, що найближчим часом навряд чи відбудуться істотні зміни в структурі, організації та принципи управління системою технічного обслуговування і ремонту. Не доводиться очікувати істотного збільшення виробничих потужностей та значного переозброєння ремонтно-експлуатаційних підрозділів. На сьогоднішній день більшість лінійно-експлуатаційних служб при лінійних виробничих управліннях не укомплектовані необхідною технікою у відповідності з діючими нормативними документами.

У зв'язку з вищевикладеним, вельми актуальними є завдання підвищення ефективності використання наявних ресурсів (матеріальних, технічних, людських та ін.), вдосконалення методів планування контрольно-відновлювальних заходів і управління ремонтно-експлуатаційними підрозділами в ході обслуговування лінійної частини з метою забезпечення надійної та безперебійної роботи газотранспортних систем.

Вирішувати подібне завдання можна на декількох рівнях. По-перше, на структурно-територіальному рівні виникає задача формування оптимальної схеми розміщення ремонтно-експлуатаційних підрозділів різної спеціалізації і потужності в регіоні обслуговування складної газотранспортної системи. По-друге, на рівні сформованої регіональної системи технічного обслуговування та ремонту виникає питання про раціональне планування контрольно-відновлювальних заходів на лінійній частині і її елементах при обґрунтованому виборі стратегій обслуговування. По-третє, на рівні окремого контрольно-відновного заходи загальної системи технічного обслуговування та ремонту необхідно забезпечити розробку найбільш ефективних організаційно-технологічних і технічних рішень в ході керування процесом експлуатації окремих ділянок.

Системний підхід як головний принцип виконаних досліджень передбачає комплексний розгляд перерахованих вище завдань, їх спільне всебічне опрацювання в ході формалізації загальної універсальної математичної моделі системи технічного обслуговування та ремонту лінійної частини магістрального газопроводу, і видачу результатів у вигляді набору організаційно-технологічних рішень щодо її вдосконалення [3].

Однією з основних задач планування контрольно-відновлювальних заходів на лінійній частині газопроводу є розрахунок оптимального режиму (періодичності) обстеження траси газопроводу з виявленням свищів, витоків і ушкоджень. Основними методами виявлення ушкоджень і несправностей на лінійній частині є методи технічного діагностування та періодичного контролю.

Реалізація поставленої задачі здійснюється методом послідовного перебору варіантів. Задаючи дискретні величини δ з визначеним кроком, прораховуються значення функції мети $\overline{З}^{КВЗ}_{\Sigma\delta}$. Причому, можна вважати, що періодичність δ [діб] приймає тільки цілочисленні значення.

Подібний підхід реалізуємо для розрахунку періодичності патрулювання як лінійної частини, так і зосереджених об'єктів магістральних газопроводів. Алгоритми розрахунків режиму контрольно-відновлювальних заходів за різних стратегій реалізовані на ПЕОМ у вигляді комплекту прикладних програм.

Аналіз практики експлуатації [4] газотранспортних систем, а також ряд нормативних документів, що регламентують проведення заходів щодо технічного обслуговування і ремонту (у тому числі і контролю), вказує на використання здебільшого сумісного методу патрулювання на рівні лінійних експлуатаційних служб. Йдеться про одночасну перевірку стану лінійної частини загалом та її елементів (зосереджених об'єктів) з виконанням дрібних профілактичних робіт. Це відноситься, як правило, до контрольних перевірок менш дорогими і продуктивними засобами (автомобільне та піше патрулювання). При використанні більш сучасних засобів контролю, таких як вертолітне патрулювання з лазерним устаткуванням, здійснюється лише пошук витоків і свищів на лінійній частині і її елементах (без проведення інших контрольних заходів профілактичного характеру). Зважаючи на те, що повітряне патрулювання здійснюється централізоване обслуговування (як правило на рівні планового) за графіком (також потребує розрахунку), задача оптимального поєднання контрольно-відновлювальних заходів і вибір їхньої періодичності викликає визначений практичний інтерес.

В загальному випадку оптимальна періодичність поєднаних контрольних перевірок визначається з умови:

$$\min_{\delta}\left[\overline{З}^{КВЗ}_{\Sigma}(\delta)+N\overline{З}^{\omega}_{\Sigma}(\delta)\right], \qquad (1)$$

де N – число контрольних зосереджених об'єктів на ділянці лінійної частини, що обслуговується.

Даний підхід реалізуємо у випадку взаємної кратності періодичності обстеження лінійної частини і зосереджених об'єктів. Іншими словами:

$$K\delta_{ЛЧ} = m\delta_{ЗО}$$
$$K = 1, 2, 3, \ldots \quad (2)$$
$$m = 1, 2, 3, \ldots$$

Тоді, оптимальна періодичність сполучених контрольних перевірок з урахуванням кратності періодів обслуговування визначається з умови:

$$\min\left[\overline{З}_{\Sigma}^{КВЗ}(\delta_{ЛЧ}) + N\overline{З}_{\Sigma}^{ЗО}(\delta_{ЗО})\right] \quad (3)$$
$$\delta_{ЗО};\ \delta_{ЛЧ}$$

Інструментом для вирішення такої двопараметричної оптимізаційної задачі прийнято метод покоординатного спуску як один з поширених методів прямого пошуку для функції декількох змінних.

Розв'язання даної оптимізаційної задачі базується на математичних моделях контрольно-відновлювальних заходів. Алгоритми розрахунків реалізовані на ПЕОМ, що дає змогу проводити різноманітні розрахунки з метою пошуку найбільш оптимальних рішень.

За останні роки усе гостріше постає проблема забезпечення безпеки і екологічності газотранспортних систем у ході експлуатації. Потужність сучасних магістральних газопроводів є такою, що ушкодження на лінійній частині спричиняють не тільки значні втрати газу і витрати на ремонтно-відновлювальні роботи, але і є джерелами великих аварій з можливими катастрофічними наслідками (у тому числі з людськими жертвами), завдають шкоди екології. Особливо актуальна ця проблема для газопроводів, що пролягають у густозаселених районах.

У зв'язку з цим при плануванні контрольно-відновлювальних заходів на діючих газових магістралях необхідно посилити вимоги до лінійних експлуатаційних служб при плануванні та проведенні обслуговування і ремонту з метою забезпечення надійної й безвідмовної роботи системи.

У рамках розроблених математичних моделей контрольно-відновлювальних заходів на об'єктах лінійної частини становить інтерес часткова задача з оптимального планування контрольних перевірок траси газопроводу при обмеженнях на втрати газу (через ушкодження і при стравлювання газу в атмосферу). У загальному виді оптимальна періодичність контрольних перевірок визначається (для лінійної частини):

$$\begin{cases} \min\limits_{\delta}\left(З_{ав}\overline{n}_{ав} + З_{п}\overline{n}_{п} + З_{пр}\delta^{-1}\right) \\ \overline{Q} \le \overline{Q}_{доп} \end{cases} \quad (4)$$

де $\overline{Q}_{доп}$ – деякий припустимий рівень збитку від утрати газу.

Дана оптимізаційна задача є екстремальною задачею з обмеженнями у вигляді нерівності, що зважується шляхом прямого пошуку в ході ітераційної процедури

Однак, часто на практиці виникає ситуація, коли оцінка показників надійності газотранспортної системи, що обслуговується, утруднена через нестачу статистичної (чи іншої) інформації. Найбільш складною є, як правило, оцінка функції розподілу випадкового часу існування ушкодження від його появи до самостійного прояву: Ф(t). За відсутності інформації про величину середнього часу життя ушкодження $\tau_{сер}$ (у рамках двостадійної моделі развалу МГ) пропонується використовувати мінімаксний підхід, як один з розповсюджених методів розв'язання оптимізаційних задач у випадку неповної інформації про стан об'єкта. При мінімаксному плануванні періодичність контрольних перевірок визначається з виразу:

$$\min_{\delta}\max_{\alpha}\overline{З}_{\Sigma}^{КВЗ}(\delta, \alpha)\ , \quad (5)$$

де $\alpha = \dfrac{1}{\tau_{СР}}$.

Під час розрахунку мінімаксної періодичності на ЕОМ обсяг обчислень істотно більше, ніж у розглянутих вище оптимізаційних задачах.

Викликає інтерес адаптивний підхід до прийняття рішень у періодичності контрольно-відновлювальних заходів на початковому етапі експлуатації, що характеризується, як правило, чи відсутністю неповноти інформації про надійність системи. Завдання полягає в первісному плануванні контрольно-відновлювальних заходів на основі мінімаксного підходу з подальшим коректуванням режиму контролю в ході експлуатації. Інформація, що накопичується, дозволяє, з часом, оцінити значення $\overline{n}_{n}^{*}$ і $\overline{n}_{ав}^{*}$. Тоді з співвідношення:

$$\overline{n}_{n} = \lambda - \overline{n}_{AB} = \frac{\lambda \cdot P}{\alpha \cdot \delta} \cdot \frac{\left(1 - e^{-\alpha\cdot\delta}\right)}{1 - (1 - P)e^{-\alpha\cdot\delta}} \quad (6)$$

одержуємо вираз для оцінки α^{*}:

$$\frac{1}{\alpha^{*}} \cdot \frac{\left(1 - e^{-\alpha\cdot\delta}\right)}{1 - (1 - P)e^{-\alpha\cdot\delta}} = \frac{\delta}{P}\left[1 + \frac{\overline{n}_{AB}^{*}}{\overline{n}_{n}^{*}}\right]^{-1}, \quad (7)$$

де $\overline{n}_{n}^{*}$, $\overline{n}_{ав}^{*}$ – відповідно число аварій і ушкоджень, що з'явилися в період між останніми перевірками,

Отримане значення показника про (далі використовується при ухваленні рішення (коректування) по періодичності контрольних заходів в умовах наявності повної інформації (з обмеженнями чи без них).

З огляду на обставину, що прийняття експонентного характеру функції розподілу Ф(t) є серйозним допущенням, доцільно систематично проводити переоцінку параметра α за даними експлуатації і вносити відповідні корективи в періодичність перевірок. Це дасть змогу методом послідовних наближень вийти на опти-

мальне рішення в будь-якому випадку, навіть якщо істинна функція розподілу Ф(t) недостатньо точно описується експонентним законом.

На ефективність контрольно-відбудовних заходів істотно впливають параметри використовуваних технічних засобів контролю, що загалом характеризуються середніми витратами на перевірку $З_{пр}$ і повну імовірність виявлення ушкоджень за результатами обстеження Р. У разі використання різних засобів контролю стану (герметичності) лінійної частини і транспортних засобів для проведення патрулювання траси показники $З_{пр}$ і Р мають різні значення в широкому діапазоні.

З обліком цього представляється важливим розглянути задачу вибору найбільш доцільних технічних засобів і методів патрулювання з погляду економічної ефективності.

Задача зводиться до послідовної оптимізації функції мети ефективності контрольно-відновлювальних заходів за різних значень $З_{пр}$, Р и періодичності δ:

$$\min_{З_{ПР},P}\ \min_{\delta}\ \overline{З}_{\Sigma}^{КВЗ}\left(\delta, З_{ПР}, P\right). \qquad (8)$$

З випадку мінімаксного планування режиму контрольно-відновлювальних заходів отримуємо вираз:

$$\min_{З_{ПР},P}\ \min_{\delta}\ \max_{\alpha}\ \overline{З}_{\Sigma}^{КВЗ}\left(\delta, З_{ПР}, P\right). \qquad (9)$$

Необхідно зауважити, що значення показників $З_{пр}$ і Р залежать від безлічі факторів. Крім здатності використовуваної апаратури і вартості її експлуатації, слід враховувати можливість об'єднання декількох різних технічних засобів при перевірках, проведення декількох контрольних проходів з метою підвищення вірогідності контролю, варійована швидкісними режимами при патрулюванні, впливу природно-кліматичних і сезонних умов експлуатації на процес обслуговування лінійної частини.

Залежно від умов експлуатації і структури конкретної газотранспортної системи змінюються й інші показники ремонтопридатності лінійної частини, такі як $З_{п}$, $З_{ав}$ та інші.

В зв'язку з цим важливим етапом проведення розрахунків з планування контрольно-відновлювальних заходів є оцінка показників ремонтопридатності ділянки газопроводу, що обслуговується на підставі статистичних чи даних непрямим шляхом.

Сформульовано вихідні дані для розрахунків за оцінкою ефективності контрольно-відновлювальних заходів на досліджуваних ділянках відповідно до розробленого вище алгоритму, які включають інформацію про конфігурацію газопровідної системи, рівні показників безвідмовності і ремонтопридатності лінійної частини, що діє в системі контролю (патрулювання) і технічного обслуговування, потужність й оснащеність ремонтно-експлуатаційних підрозділів.

Розрахунки і дослідження свідчать, що оптимальна періодичність патрулювання лінійної частини, що відповідає мінімальному значенню показника ефективності контрольно-відновлювальних заходів, коливається в широких межах – від 3 до 55 доби – і істотно залежить від стану газотранспортної системи, показників ремонтопридатності лінійної частини на заданих ділянках, наслідків аварійних ситуацій на газопроводі, вартості і вірогідності прийнятих засобів контролю. Виконано розрахунки з метою оцінки ефективності використання альтернативних засобів контролю герметичності лінійної частини в ході патрулювання. За об'єкт дослідження прийнято окрему ділянку газопроводу із фіксованими показниками безвідмовності і ремонтопридатності. Обґрунтовано ефективність періодичного контролю стану лінійної частини шляхом автомобільного патрулювання з використанням газоаналізаторів.

Усе це підтверджує необхідність окремих розрахунків для планування режиму контрольно-відновлювальних заходів для кожної конкретної газотранспортної системи з урахуванням специфіки експлуатації. Отримані результати доводять ефективність застосування даної розробки в ході організації експлуатаційного обслуговування лінійної частини магістральних газопроводів.

Література

1 Васильев Г.Г. Вопросы планирования организации ремонта газопроводов / Г.Г.Васильев, А.В.Шибнев, Е.И. Яковлев. – М.: ВНИИЭГАЗпром, 1989. – 59 с.

2 Байхельт Ф. Надежность и техническое обслужиание. Математический поход / Ф.Байхельт, П.Франкен; пер. с нем. – М.: Радио о связь, 1388. – 392 с.

3 Райбман Н.С. Построение моделей процессов производства / Н.С.Райбман, В.Н.Чадаев. – М.: Энергия, 1976. – 374 с.

4 Королева И.А. Направления совершенствования систем управления газотранспортными комплексами в современных условиях // Тезисы докл. на всесоюз.научн.-техн. конф. «Проблемы развития нефтегазового комплекса страны» / Королева И.А., Ким А.О., Грудз В.Я. – Красный Курган, 1991. – 54 с.

Стаття надійшла до редакційної колегії 26.02.13
Рекомендована до друку професором ***Грудзом В.Я.*** *(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ) канд. техн.. наук* ***Шелковським Б.І.*** *(Українська нафтогазова академія, м. Львів)*

УДК 621.644.07:620.179.17

АКУСТИКО-ЕМІСІЙНА ОЦІНКА СТАНУ ОБЛАДНАННЯ НАФТОПОМПУВАЛЬНОЇ СТАНЦІЇ

[1]В.Р. Скальський, [2]Р.М. Басараб, [1]О.М. Станкевич

[1]Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України
79060, м. Львів, вул. Наукова, 5, тел. (0322) 631264

[2] Львівська філія "Магістральні нафтопроводи "Дружба" ВАТ "Укртранснафта"
79000, м. Львів, вул. Липинського, 12, тел. (0322) 725506

Представлено методику технічного діагностування обладнання нафтопомпувальної станції за критерієм оцінки типів руйнування конструкційних матеріалів за параметрами вейвлет-перетворення сигналів акустичної емісії (АЕ). Наведено результати її застосування під час планового обстеження нафтопомпувальної станції "Плещівка" філії "Магістральні нафтопроводи "Дружба" ВАТ "Укртранснафта".

Ключові слова: нафтопомпувальні станції, руйнування, діагностування, акустична емісія, вейвлет-перетворення

Представлена методика технического диагностирования оборудования нефтеперекачивающей станции по критерию оценки типов разрушения конструкционных материалов по параметрам вейвлет-преобразования сигналов акустической эмиссии (АЭ). Показаны результаты ее применения во время планового обследования нефтеперекачивающей станции "Плещивка" филиала "Магистральные нефтепроводы" Дружба " ОАО "Укртранснефть".

Ключевые слова: нефтеперекачивающие станции, разрушение, диагностирование, акустическая эмиссия, вейвлет-преобразование.

A new technique for technical diagnostics of oil pumping stations objects based on the spectral characteristic of acoustic emission signals (AE) and on the parameter their wavelet transformation is offered. The developed technique was applied during inspection at oil pumping stations "Pleschivka" of the open stock joint company "Ukrtransnafta".

Key words: oil pumping stations, fracture, diagnostic, acoustic emission, wavelet transformation.

Оскільки характерними особливостями сучасних нафтопроводів є їх велика протяжність і значні об'єми помпування нафти, до основних проблем відносять забезпечення якісної експлуатації, ефективної роботи нафтопроводів і мінімізації шкоди для навколишнього середовища. Нафтопроводи потребують постійного контролю і заміни зношених ділянок. Основні магістральні нафтопроводи здебільшого не мають резервів, тому їх відмова призводить до збою постачання нафти і нафтопродуктів. Ремонт у встановлені терміни, а також попередження аварійних ситуацій належать до завдань державного значення.

Актуальність досліджень. Система магістральних нафтопроводів України (рис. 1) налічує 18 нафтопроводів діаметром до 1220 мм загальною довжиною 3506,6 км (в одну нитку – 4767,1 км, нафтопомпувальні станції (НПС) і морський нафтовий термінал (МНТ) "Південний", резервуарні парки, системи електропостачання, захисту від корозії, телемеханіки, технологічного зв'язку, протипожежні та протиерозійні споруди тощо. Пропускна спроможність системи на вході – 114 млн. т/рік, на виході – 56,3 млн. т/рік [1].

За даними статистичних досліджень більшість аварій на нафтопроводах виникають внаслідок людського чинника [2] (рис. 2): 34,7 % – зовнішні фізичні (силові) дії на трубопроводи, у тому числі кримінальні врізання, що спричиняють витоки; 24,7 % – порушення норм і правил проведення робіт під час будівництва і ремонту, відхилення від проектних рішень; 12,4 % – порушення технічних умов під час виготовлення труб і устаткування; 4,7 % – помилкові дії експлуатаційного і ремонтного персоналу. Значний відсоток (23,5 %) аварій відбувається через корозивні пошкодження труб, запірної і регулюючої арматури.

Якщо усунути людський чинник, то за останніми статистичними даними майже 80% усіх відмов нафтопроводів зумовлено первинними корозійно-механічними пошкодженнями та утворенням і подальшим розвитком поверхневих тріщиноподібних дефектів у місцях корозивних каверн і зварних з'єднань [3, 4].

Стан проблеми. Термін експлуатації більшості нафтопроводів України перевищує 30-35 років, що спонукає до особливої уваги стосовно технічного стану їх обладнання (табл. 1).

Для оцінки технічного стану складових елементів магістральних нафтопроводів і прийняття рішення про можливість їх подальшої безпечної експлуатації використовують різноманітні методи і засоби неруйнівного контролю (НК) [5]. Методика технічного діагностування зазначених об'єктів передбачає застосування методів НК комплексно. До найпоширеніших і добре розвинутих серед сучасних методів НК, що застосовуються з метою виявлення експлуатаційних тріщиноподібних дефектів, належать

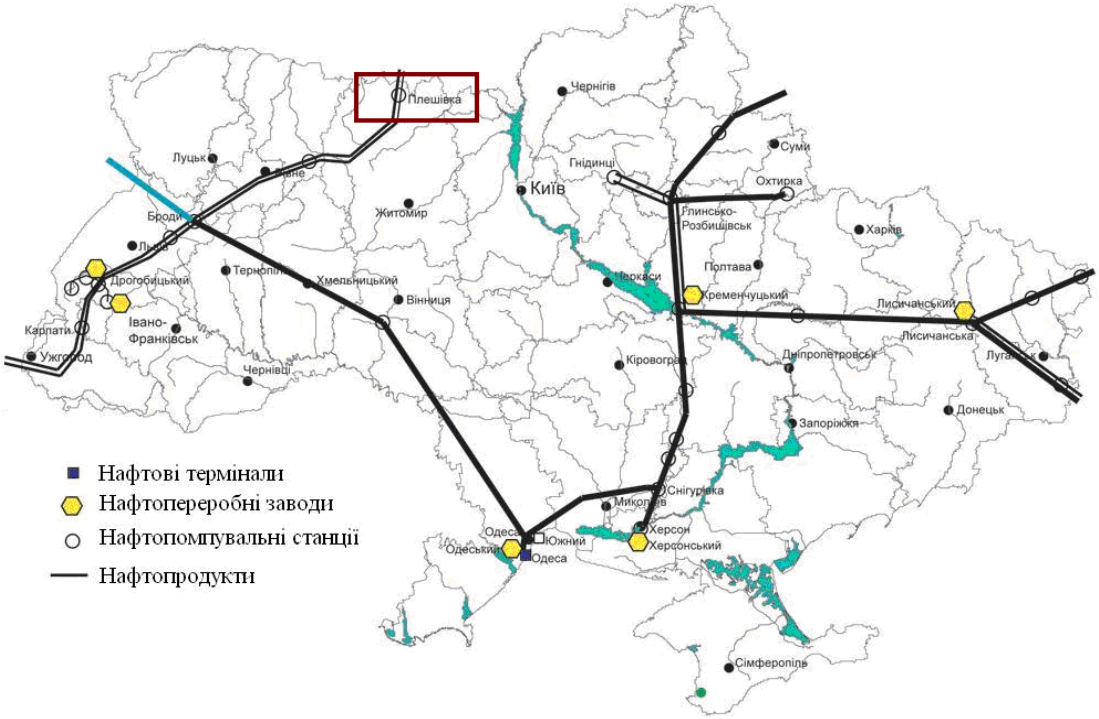


Рисунок 1 – Схема системи магістральних нафтопроводів України

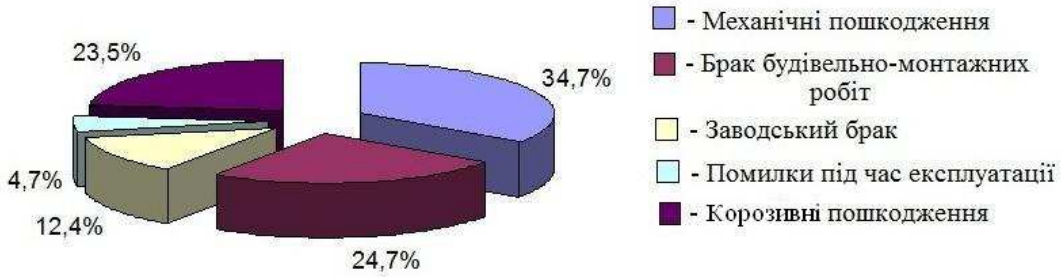


Рисунок 2 – Розподіл причин аварій на магістральних трубопроводах у % від загальної кількості відмов

акустичні методи (ультразвуковий, акустичної емісії (АЕ) та вібродіагностичний). Наприклад, методом АЕ можна виявити джерела зародження та розвитку руйнування під час навантаження елемента обладнання зміною тиску, встановити приблизні координати дефектів, оцінити стан конструкції на основі аналізу її сигналів. Ультразвуковий метод НК дає змогу, окрім місця знаходження дефекту, визначити його геометричні характеристики, глибину залягання тощо. Застосування цих двох методів дає можливість точніше оцінити ступінь небезпеки дефекту та надати висновок про можливість подальшої експлуатації обладнання трубопроводу.

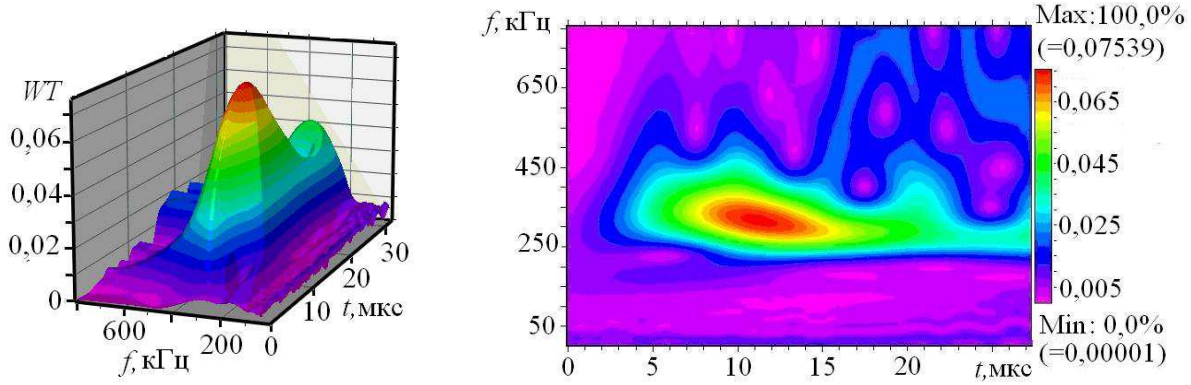
Розвиток тріщин (крихке руйнування) у матеріалі – процес непередбачуваний, швидкоплинний, а тому найнебезпечніший щодо цілісності та безвідмовної роботи об'єкта контролю (ОК). Існує низка підходів використання методу АЕ для побудови критеріїв і методик ідентифікування типів макроруйнування конструкційних матеріалів (крихке чи в'язке) на ранніх стадіях його розвитку та у будь-який момент часу експлуатації конструкції чи виробу за: енергією [6], амплітудними [7] та частотними характеристиками [8] сигналів АЕ, найстійкішими параметрами АЕ-сигналів з урахуванням режимів вимірювального АЕ-тракту [9]. У більшості випадків для аналізу сигналів АЕ використовують перетворення Фур'є, яке не дає часової локалізації особливостей сигналів, що відповідають певним механізмам руйнування. Для кількісної оцінки типів руйнування конструкційних матеріалів нами запропоновано критеріальний показник на основі параметрів неперервного вейвлет-перетворення (НВП) у фіксований момент часу [10, 11].

Отже, за допомогою ефективних методик оцінки типів руйнування можна у реальному режимі часу оцінити стан матеріалу ОК, виявити найнебезпечніші механізми руйнування, а відтак, запобігти виникненню аварійної ситуації.

До основних об'єктів системи магістральних нафтопроводів України належить ділянка трансконтинентального нафтопроводу "Дружба". Зокрема, складовою частиною цього нафтопроводу є НПС "Плещівка" (див. рис. 1), яка обслуговує ту частину нафтопроводу, що про-

Таблиця 1 – Технічні характеристики лінійної частини магістральних нафтопроводів України

№ з/п	Назва нафтопроводів	Рік уведення в експлуатацію	Термін експлуатації, років	Діаметр, мм	Протяжність в одну нитку, км
1	Мічурінськ-Кременчук	1974	38	720	355,0
2	Гніденці-Гл.Розбишівська I, II нитки	1966/1972	46/40	377	128,6
3	Гл.Розбишівська-Кременчук	1966	46	530	148,3
4	М. Павлівка-Гл. Розбишівська	1967	45	377	73,7
5	Самара-Лисичанськ	1977	34	1220	164,7
6	Лисичанськ-Тихорецьк I, II нитки	1975/1989	37/23	720	413,8
7	“НПС Лисичанськ-Лисичанський НПЗ” I, II нитки км 0-7	1975	37	720	14,0
8	Лисичанськ-Кременчук	1978	34	1220/1020	421,3
9	Кременчук-Херсон	1972	40	720/1020	393,6
10	Снігурівка-Одеса	1977	35	720/1020	249,7
11	Мозир-Броди I, II черга	1963/1974	49/38	720	727,3
12	Броди-Держкордон I, II черга	1962	50	530/720	650,0
13	Відвід на Угорщину км 0-21,4	1972	40	720	21,9
14	Одеса-Броди	2002	10	1020	673,7
15	Долина-Дрогобич	1962	50	273	58,7
16	Жулин-Дрогобич	1999	13	530	43,1
17	Орів-Дрогобич	1973	39	219	23,8
18	Борислав-Дрогобич	1983	29	168	8,1
	Разом	1962/2002	50/10	168/1220	4569,4



а *б*

Рисунок 3 – Результат НВП у вигляді тривимірної поверхні (*а*) та проекції спектра на площину з ізолініями (*б*).

ходить через Житомирську, Хмельницьку та Рівненську області. Її основна функція полягає у забезпеченні перекачування нафти від Мозиря до Бродів та підтримання тиску у трубопроводі.

Мета роботи − виявити утворення та розвиток тріщиноподібних дефектів на обладнанні НПС за критерієм оцінки типів руйнування конструкційних матеріалів на основі параметрів вейвлет-перетворення сигналів АЕ та видати рекомендації щодо подальшого їх експлуатування.

Методика досліджень. Для обробки сигналів АЕ широко застосовують різні види вейвлет-перетворення, зокрема неперервне [12]. У результаті НВП одержують спектр коефіцієнтів кореляції сигналу з вейвлетом у вигляді поверхні у тривимірному просторі (рис. 3, *а*). На основі проекції спектра на площину з ізолініями (рис. 3, *б*) можна прослідкувати зміну коефіцієнтів на різних масштабах у часі, а також виявити локальні екстремуми структури досліджуваного процесу. Великі значення вейвлет-коефіцієнтів означають наявність у сигналі значних флуктуацій у даний момент часу і одночасно хорошу відповідність огинаючої сигналу і вей-

влета. Чим сильніше виражена особливість сигналу, тим більше вона виділяється на спектрограмі і тим вищий рівень вейвлет-коефіцієнтів [13].

У наших дослідженнях для побудови неперервного вейвлет-перетворення сигналів АЕ використали програмний пакет AGU-Vallen Wavelet [14], в якому за материнський вибрано вейвлет Габора.

Враховуючи властивості максимальних значень вейвлет-коефіцієнтів та результати експериментальних досліджень, запропоновано критерій оцінювання типів макроруйнування матеріалів за основними характеристиками неперервного вейвлет-перетворення сигналів АЕ [10, 11]. На основі обчислення критеріального параметра

$$\kappa = WT_{\max} \times \Delta f_0 / \Delta f, \qquad (1)$$

який враховує максимальне значення вейвлет-коефіцієнта $WT_{\max}$, ширину смуги частот Δf, що йому відповідає, та ширину робочої смуги АЕ-тракту Δf_0, що визначається робочою смугою частот первинного перетворювача, встановлюють тип макроруйнування, що відбувається у даний момент часу в ОК.

Отже, в основі методики випробувань матеріалів виробів та елементів конструкцій, що враховує запропонований критерій. лежить така послідовність дій [9]:

1) вибрати тип первинного перетворювача (ПАЕ) та встановити його робочу смугу пропускання (для обчислення критеріального показника к покладаємо ширину робочої смуги АЕ-тракту Δf_0=0,4 МГц, якщо ж смуга робочих частот вибраного ПАЕ відмінна від $0{,}2 \le f_0 \le 0{,}6$ МГц, то під час обчислень необхідно врахувати поправковий множник);

2) вибрати місця встановлення ПАЕ на ОК з урахуванням заникання пружних хвиль АЕ в матеріалі;

3) здійснити відповідні налаштування АЕ-апаратури;

4) провести калібрування чутливості ПАЕ на ОК;

5) здійснити відбір АЕ-інформації під час роботи ОК або збудити в ньому пружні хвилі АЕ за регламентованими відповідними ДСТУ чи іншими чинними галузевими документами;

6) побудувавши НВП сигналу АЕ; визначити характеристики, що входять до складу критеріального параметра к: максимальне значення вейвлет-коефіцієнта;, за проекцією на площину "вейвлет-коефіцієнт–частота" визначити ширину смуги частот;

7) за залежністю (1) обчислити кількісне значення критеріального параметра к і зіставити його з критеріями в'язкого ($\kappa < 0{,}1$), квазікрихкого ($0{,}1 \le \kappa < 0{,}2$) чи крихкого ($\kappa \ge 0{,}2$) руйнування;

8) встановити тип руйнування в даний момент часу з урахуванням навантаження чи деформації об'єкта контролю;

9) визначити місце знаходження джерела, що згенерувало зареєстровану подію АЕ;

10) прийняти рішення щодо розмірів та орієнтації тріщиноподібного дефекту за відомими аналітичними залежностями або оцінити об'ємну пошкодженість локалізованого об'єму руйнування;

11) оформити протокол випробувань даного ОК.

Результати досліджень та їх обговорення. Під час технічного діагностування наземного технологічного обладнання НПС використовували одночасно дві АЕ-системи SKOP-8M під час навантаження вузлів внутрішнім тиском із одночасною реєстрацією сигналів АЕ. Для випробувань на окремих ділянках станції тиск у нафтопроводі змінювали двома способами: зменшенням з 3,8 до 0,9 МПа та підвищенням тиску компресорною станцією від 1,0 до 6,25 МПа (рис. 4).

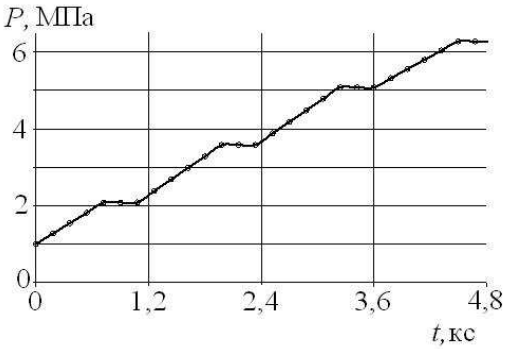


Рисунок 4 – Графік зміни тиску *P* в елементах обладнаннях вузлів магістральних помпувальних агрегатів і зворотних клапанів I черги

Для АЕ-діагностування зародження та розвитку дефектів в елементах вузлів магістральних помпувальних агрегатів використали квазірезонансні ПАЕ з робочою смугою частот 0,2...0,6 МГц. Коефіцієнт підсилення попередніх підсилювачів становив 34 дБ. Діагностування проводили за температури $+8^0$С і максимального тиску у трубопроводі 6,25 МПа.

Перед початком робіт було здійснено відповідні налаштування портативних АЕ-систем SKOP-8M: кількість вимірювальних каналів − 8 (підсилення кожного 40 дБ); тривалість вибірки (мс) − 2; період дискретизації аналогового сигналу (мкс) − 0,5; частота зрізу фільтра низьких частот (кГц) − 600; фільтра високих частот (кГц) − 200; поріг дискримінації (%) − 28; рівень власних шумів, приведених до входу попереднього підсилювача (мкВ) − 7.

Для експериментального визначення коефіцієнта заникання пружних хвиль АЕ у матеріалі ОК скористались розробленою у ФМІ ім. Г. В. Карпенка НАН України методикою [9]. Спочатку ПАЕ розташовували на трубопроводі за лінійною схемою з кроком 0,3 м та збуджували пружну хвилю АЕ на віддалі 0,3 м від 1-го ПАЕ за допомогою зонда-імітатора АЕ-системи SKOP-8M.

Вибравши максимальні амплітуди зареєстрованих сигналів АЕ та апроксимувавши їх за співвідношенням (2)

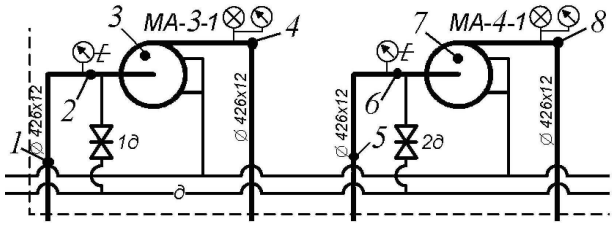
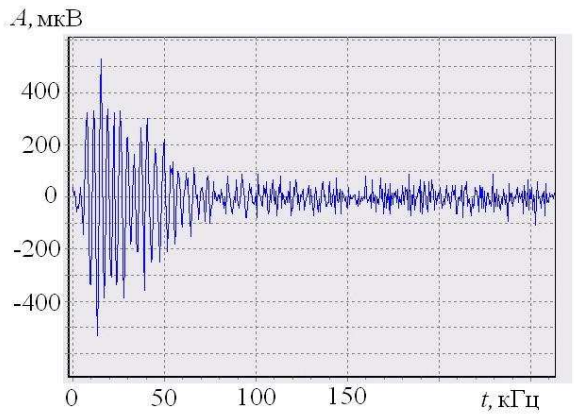


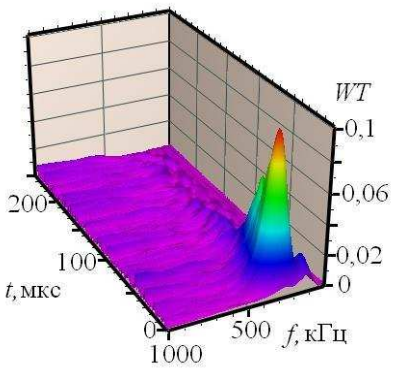
Рисунок 5 – Схема розташування ПАЕ (точки *1-8*) на ділянці АЕ-діагностування помпувальних агрегатів

Таблиця 2 – Геометрія розташування ПАЕ на ОК

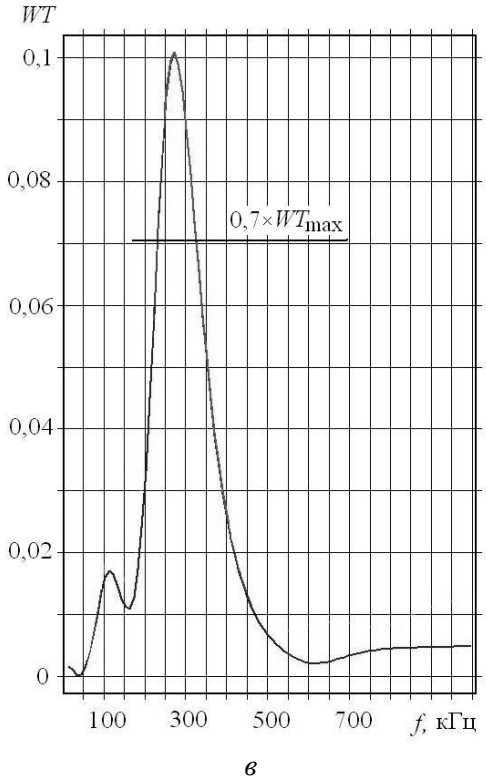
Номери ПАЕ	*1-2*	*2-3*	*3-4*	*5-6*	*6-7*	*7-8*
Відстань між ПАЕ, м	2,5	1,2	1,5	2,5	1,2	1,5



а



б



в

Рисунок 6 – Хвильове відображення сигналу АЕ (*а*); НВП (*б*) та його проекція на площину "*WT-f*" у момент часу, що відповідає WT_{max} (*в*)

$$y = de^{-\delta x}, \qquad (2)$$

де δ – коефіцієнт заникання,

x – шлях проходження хвилі,

d – коефіцієнт апроксимації, зробили висновок, що ПАЕ на прямих ділянках нафтопроводу можна розташувати з кроком не більше 4 м, а на технологічному обладнанні (засувки, клапани, трійники, коліна, корпуси обладнання, що виготовлені за допомогою литва) – не більше 1 м (рис. 5, табл. 2).

За результатами АЕ-досліджень на всіх ОК було зареєстровано сигнали, які не перевищували встановлений поріг дискримінації, тобто вимірювальна система їх реєструвала як шуми.

На ділянці навколо ПАЕ № 5 вузла магістральних помпувальних агрегатів черги I під час зміни тиску від 1,0 до 6,25 МПа зі швидкістю 0,05 МПа / хв зареєстровано 48 сигналів АЕ, які за інтегральним критерієм ступеня небезпеки (РД 03-131-97) належать до класу 2 (активне джерело) [9].

На рисунку 6 зображено характерний вид цих сигналів АЕ.

Зазначимо, що їх особливістю є вузькі спектри домінуючих частот (рис. 6, *в*), незалежно від величини максимального значення амплітуди сигналу. Проаналізувавши дані сигнали АЕ за допомогою неперервного вейвлет-перетворення (рис. 6, *б*, *в*), встановили, що: діапазон

значень максимальних вейвлет-коефіцієнтів становить $WT_{\max}$ – 0,08-0,16; ширина смуги спектрів частот Δf на рівні $0{,}7\times WT_{max}$ – 55-170 кГц; діапазон значень критеріального параметра к – 0,2-1,0 – крихке руйнування.

Згідно з розробленим алгоритмом оцінки крихкого руйнування та методики АЕ-діагностування за таких високих значень критеріального параметра було зроблено висновок про необхідність додаткових обстежень досліджуваної ділянки іншими методами НК на предмет виявлення та оцінки розмірів тріщиноподібних дефектів. У результаті проведених досліджень ультразвуковим і магнетним методами виявили тріщину на згині трубопроводу, яка розвивалась. Для забезпечення подальшої безпечної експлуатації об'єкта ділянку з виявленим дефектом замінили новим елементом.

Висновки

У роботі запропоновано методику випробувань виробів та елементів конструкцій, яка передбачає ідентифікування типів руйнування конструкційних матеріалів на ранніх стадіях його розвитку та у будь-який момент часу експлуатації об'єкта контролю. **З**астосування запропонованого критерію оцінки типів руйнування конструкційних матеріалів за параметрами вейвлет-перетворення сигналів АЕ під час діагностування обладнання нафтопомпувальної станції дало змогу виявити сигнали, для яких значення критеріального параметра становили $0{,}2 \le \kappa \le 1{,}0$, що відповідає крихкому руйнуванню. А це означає, що об'єкт контролю мав дефект, який під час додаткового навантаження розвивався. Враховуючи ступінь небезпеки такого явища, за результатами перевірки іншими методами НК дефектне місце трубопроводу замінили придатним до експлуатації елементом.

Результати проведеного АЕ-діагностування обладнання нафтопомпувальної станції підтвердили ефективність запропонованої нами методики та засобів АЕ-діагностування.

Перспективним напрямком подальших досліджень для підвищення чутливості методу АЕ під час технічного діагностування реальних об'єктів є застосування та розроблення нових методів і прийомів обробки АЕ-інформації з використанням вейвлет-аналізу, зокрема, поєднання неперервного та дискретного вейвлет-перетворень.

Література

1 Укртранснафта. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.ukrtransnafta.com/ua/.

2 Андрусяк А. В. Аналіз і причини відмов на нафтопроводі та фактори, які впливають на їх експлуатацію / А. В. Андрусяк // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2008. – № 4. – С. 83–85.

3 Особливості корозії та корозійно-механічного руйнування тривало експлуатованих сталей магістральних трубопроводів / О. І. Звірко, З. В. Слободян, О. Т. Цирульник та ін. // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2007. – № 2. – С. 81–86.

4 Дмитрах І. М. Вплив корозійних середовищ на локальне руйнування металів біля концентраторів напружень / І. М. Дмитрах, В. В. Панасюк. – Львів: ФМІ НАНУ, 1999. – 341 с.

5 Гумеров А. Г. Диагностика оборудования нефтеперекачивающих станций = Diagnostics of equipment in oil pumping stations / А. Г. Гумеров, Р. С. Гумеров, А. М. Акбердин. – М. : Недра, 2003. – 346 с.

6 Mirabile M. Acoustic emission energy and mechanisms of plastic deformation and fracture / M. Mirabile // Nondestructive testing. – 1975. – 8, № 2. – P. 77–85.

7 Gerberich W. An acoustic emission investigation of microscopic ductile fracture / W. Gerberich, D. G. Atteridge, J. F. Lessar // Metallurgical Transactions. – 1975. – A6, № 4. – P. 797–801.

8 Теоретические концепции метода акустической эмиссии в исследовании процессов разрушения / А. Е. Андрейкив, Н. В. Лысак, О. Н. Сергиенко, В. Р. Скальский (Препр. / АН УССР. Физ.-мех. ин-т; № 137). – Львов, 1987. – 49 с.

9 Назарчук З. Т. Акустико-емісійне діагностування елементів конструкцій: науково-технічний посібник: у 3 т./ З. Т. Назарчук, В. Р. Скальський. – Т. 2: Методологія акустико-емісійного діагностування. – К.: Наукова думка, 2009. – 263 с.

10 Скальський В. Р. Використання вейвлет-перетворення сигналів акустичної емісії для визначення особливостей крихкого руйнування скла / В. Р. Скальський, О. М. Станкевич // Наукові нотатки: міжвузівський збірник (за напрямом "Інженерна механіка"). – Луцьк. – Вип. 33. – 2011. – С. 213–219.

11 Діагностування механізмів руйнування сталі 38ХН3МФА за вейвлет-перетворенням сигналів акустичної емісії / В. Р. Скальський, Л. Р. Ботвіна, О. М. Станкевич та ін. // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2011. – № 3. – С. 12–17.

12 Терентьев Д. А. Вейвлет-анализ сигналов АЭ в тонкостенных объектах / Д. А. Терентьев, С. В. Елизаров // Контроль. Диагностика. – 2008. – № 7. – С. 51–54.

13 Дремин И. М. Вейвлеты и их использование / И. М. Дремин, О. В. Иванов, В. А. Нечитайло // Успехи физических наук. – 2001. – Т. 171, № 5. – С. 465–501.

14. Vallen Systeme: The Acoustic Emission Company. – [Virtual Resource]. – Access Mode: http://www.vallen.de.

Стаття надійшла до редакційної колегії 28.02.13
Рекомендована до друку професором ***Мойсишиним В.М.*** *(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ) канд. техн.. наук* ***Шелковським Б.І.*** *(Українська нафтогазова академія, м. Львів)*

УДК 662.758.2

ЕКОНОМІЯ ВИТРАТИ МОТОРНИХ ОЛИВ І ПАЛИВ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ РУХОМОГО СКЛАДУ НАФТОГАЗОВОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО ТРАНСПОРТУ

В.С. Дмитренко, В.В. Дмитренко, Б.Д. Процюк, Т.Й. Войцехівська, Н.М. Рогів

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська,15, тел. (0342) 727148,
e-mail: p u b l i c @ n u n g . e d u . u a

В сучасних умовах економіки актуальною є проблема зменшення витрати олив і палива для рухомого складу нафтогазового технологічного транспорту. Виконаний огляд вказав на можливість вирішення цієї проблеми шляхом використання технічних добавок до олив і палив. Результати експлуатаційних випробувань технічних добавок засвідчили високу ефективність останніх у газових, бензинових і дизельних двигунах, а саме: зменшення витрати оливи на вигорання у два рази, і витрати палива в середньому на 10%. Вперше досягнуто результат по ресурсу дизельного двигуна – 1600000 км пробігу у випадку використання технічної добавки. Все це дасть змогу підвищити рівень технічної готовності нафтогазового технологічного транспорту. Такі результати досягнуті за першою категорією умов експлуатації в природно-кліматичних умовах помірного типу. Результати досліджень впроваджені на станції технічного обслуговування рухомого складу нафтогазового технологічного транспорту Приватного Акціонерного Товариства АТП 12629 у місті Івано-Франківську. Проведено розрахунки необхідної кількості технічних добавок для основних агрегатів базових автомобілів нафтогазового технологічного транспорту з врахуванням їх вартості.

Ключові слова: зниження тертя, олива, технічна добавка.

В современных условиях экономики актуальна проблема уменьшения расхода масел и топлива для подвижного состава нефтегазового технологического транспорта. Выполнен обзор указал на возможность решения этой проблемы путем использования технических добавок к маслам и топливам. Результаты эксплуатационных испытаний технических добавок показали высокую эффективность последних в газовых, бензиновых и дизельных двигателях, а именно: уменьшение расхода масла на выгорания в два раза, и расхода топлива в среднем на 10%. Впервые достигнут результат по ресурсу дизельного двигателя - 1600000 км пробега в случае использования технической добавки. Все это позволит повысить уровень технической готовности нефтегазового технологического транспорта. Такие результаты достигнуты по первой категории условий эксплуатации в природно-климатических условиях умеренного типа. Результаты исследований внедрены на станции технического обслуживания подвижного состава нефтегазового технологического транспорта Частного Акционерного Общества АТП 12629 в городе Ивано-Франковске. Проведены расчеты необходимого количества технических добавок для основных агрегатов базовых автомобилей нефтегазового технологического транспорта с учетом их стоимости.

Ключевые слова: снижение трения, масло, техническая добавка.

How to reduce volumes of oils and fuels consumpted by motor vehicles in oil and gas industry is a pressing issue of today's economy. On the basis of the scientific literature analysis, the authors found out that the issue can be solved using technical additives to oils and fuels. The results of the performance test proved the high efficiency of using technical additives in the gas, oil and diesel engines, namely: oil burn-out decreased twice while fuel concumption – by an average of 10 percent. Due to using technical additives, the diesel engine resource fatigue life achieved 1,600,000 km for the first time ever. This would raise the level of technical readiness of motor vehicles in oil and gas industry. The results of the research were introduced at the station for oil and gas industry motor vehicles АТП 12629, motor transportation private joint stock company in Ivano-Frankivsk. Calculations of quantities technical additives necessary for major aggregates of basic oil and gas technological transport vehicles taking into account their costs.

Keywords: reduction of friction, oil, technical supplement.

Постановка проблеми. У технологічному процесі розвідки родовищ нафти і газу, розробки і експлуатації нафтових і газових свердловин використовується рухомий склад нафтогазового технологічного транспорту. Сюди відносяться каротажні підйомники для спуско-підіймальних операцій у базі геофізичних досліджень в свердловинах на нафту і газ, лабораторії геофізичної розвідки свердловин, сейсморозвідувальні вібраційні установки, установки для поточного і капітального ремонту нафтових і газових свердловин, пересувні компресорні станції тощо.

Приведення в рух складу і навісного устаткування здійснюється від бензинових і дизельних двигунів транспортних засобів через елементи трансмісії, що включають коробку відбору потужності і коробку зміни передач, редуктори, ланцюгові передачі, вали з підшипниковими вузлами та інше. Для забезпечення надійної роботи двигунів і агрегатів трансмісії використовуються високоякісні оливи і високовартісні бензини і дизельні та газові палива: стиснений природний і скраплений нафтовий газ. Зменшення витрати моторних олив і палив при експлуатації нафтогазового технологічного транспорту є важливим елементом енергозао-

щадження і раціональної екології. Особливо важливим є вирішення цього завдання у зв'язку із прогнозованим зменшенням видобутку нафти і газу та виробництва моторних палив і, зокрема, палив для транспортування і приводу навісного устаткування НГТТ.

Питання витрати моторних палив значною мірою досліджувалось із врахуванням таких чинників, як природно-кліматичні умови, якість технічного обслуговування та ремонту, конструкція систем живлення двигунів для привода навісного устаткування та ін. Проте недостатньо досліджено вплив різних технічних добавок до олив, антифрикційних кондиціонерів металу та малов'язких олив на витрату моторних палив. Тому це питання є актуальним.

Огляд літератури. Технічні добавки додаються до олив з метою зниження тертя і зношування та зменшення експлуатаційної витрати палива на 10 % [3].

Фірма ХАДО так описує свою технологію використання технічної добавки: у вихідному стані поверхня тертя складається із мікровиступів і мікровпадин, на яких наявні продукти зношування і розкладання олив. Під час роботи двигуна виступи мікрорельєфа розмелюють на частинки технічну добавку (кондиціонер металу) ХАДО, самі зламуються і за високих температур протікає реакція заміщення з утворенням нових кристалів. Таким чином, в місцях виступів з'являються перші плями захисного шару, що зменшує коефіцієнт тертя і витрату палива [5].

Інша технічна добавка – дисульфід молібдену (MoS_2) – протизадирна і протизносна присадка в оливі. Пошарові структури дисульфід молібдену витримують великі навантаження у вузлах тертя і зменшують витрату палива.

Ефективність технічної добавки антифрикційного кондиціонера металу ХАДО дала можливість створити оливи ХАДО Atomic Oil, які забезпечують зменшення витрати палива, що підтверджено сертифікаційними дослідженнями у 35 країнах світу [5]. При використанні ревіталізанта ХАДО коефіцієнт тертя дорівнює 0,007-0,003 (зниження коефіцієнта тертя відбувається в 100…300 разів), мікротвердість поверхонь дорівнює 450-750кг/мм^2, і як наслідок, економія палива на холостому ході до 30% [7]. Так, наприклад, мінеральна олива ХАДО Atomic Oil 15W-40 SL/CI-4 з температурою використання – 20^0C + 40^0C для дизельних двигунів, в тому числі обладнаних системою рециркуляції відхідних газів дає зменшення витрати палива на 0,4 … 0,5 л/100 км порівняно з оливою без технічної добавки при роботі за міським циклом і на трасі відповідно.

Синтетична моторна олива ХАДО Atomic Oil OW-40 SL/CF для двигунів з турбонагнітачем і безпосереднім впорскуванням палива забезпечує за рахунок технічної добавки зменшення зносу у 80 разів і стабільно низьку витрату палива.

Синтетична моторна олива ХАДО Atomic Oil OW-30, SL/CF має високі енергозберігаючі властивості і забезпечує екологічні характеристики двигуна, а висока компресія двигуна за рахунок дії технічної добавки забезпечує повне згоряння палива і його малу витрату [5].

Проте в сучасних АТЗ для отримання вагомого заощадження палива є необхідним використання добавок не тільки до моторних, але й до трансмісійних олив.

Напівсинтетична трансмісійна олива для автоматичних трансмісій ХАДО Atomic Oil ATF VI, яка відповідає специфікації DEXRON V, має аналогічні переваги і температуру застигання -54^{0}C. Завдяки пониженій високотемпературній в'язкості максимально знижені гідродинамічні втрати в АКПП і досягається додаткова економія палива під час руху автомобіля.

Широкого застосування набули технічні добавки ХАДО у вигляді гель-ревіталізантів. Використання ХАДО гель-ревіталізанта для відновлювального ремонту і подальшого захисту від зношування циліндро-поршневої групи двигуна без його розбирання для бензинового і дизельного двигунів формує на поверхнях пар тертя металокерамічне покриття (деталі двигуна нарощуються в об'ємі), відновлюють свою геометрію. В результаті оновлений агрегат за своїми експлуатаційними характеристиками є кращим за новий і гарантовано буде служити у 2…4 рази довше звичайних, з меншою витратою палива (до 30% на холостому ході), особливо на повноприводних автомобілях.

ХАДО гель-ревіталізант для КПП і редукторів призначений для відновлювального ремонту КПП і редукторів навісного устаткування і захисту їх від зносу. Гель активує плями контакту в зачепленні шестерень, знижує шум і вібрацію в 10 разів, покращує роботу синхронізаторів і, крім того, при аварійному витоку оливи дозволяє довго експлуатувати вузли трансмісії (до 100 км) і сприяє зменшенню витрати палива.

Перед застосуванням ревіталізантів для зменшення витрати палива здійснюється очищення бензинових і дизельних двигунів, в тому числі з турбонаддувом, від забруднень, а також агрегатів трансмісії із застосуванням очисних засобів з ефектом ревіталізації (очисник ХАДО Fita Flusk). Завдяки наявності очисника відновлюється до 70% втраченого металу, тобто ХАДО – це засіб не тільки для промивання, але й для захисту від зносу. Використовується очисник також для адаптаційного промивання при переході на оливи іншої в'язкості, іншого сорту (наприклад, з мінеральної на синтетичну) іншого виробника. Відновлює він також рухомість оливозйомних і компресійних кілець, усуває ефект залипання в гідрокомпенсаторі, очищує систему вентиляції картера, відновлює і захищає від зносу тертьові деталі, збільшує потужність двигуна і зменшує витрату палива.

Інша технічна добавка, що забезпечує зменшення витрати палива, – кондиціонер металу Roil Gold [3] від компанії Neways, що випускає і реалізує його більше, як у 40 країнах світу, гарантуючи його високу ефективність.

При змащуванні оливою Mobil-1 пари тертя на машині тертя «Фолекс» під навантаженням 20 кг пляма зносу склала 6 мм, а питоме навантаження – 10 МПа. При додаванні кондиціонера металу Roil Gold під навантаженням 300 кг (у 15 разів більше) площа плями зносу склало 1,2 мм, а питоме навантаження – 3000 МПа, тобто у 300 разів більше. При додаванні води (емітація потрапляння води до системи живлення) задиру не відбулося. Це є шлях до зменшення тертя і зносу деталей і витрати палива. До складу Roil Gold входять галогенізовані вуглеводні, котрі вступають в дію при контакті з металом. Температура, тиск і тертя підсилюють і прискорюють процес. В зоні контакту деталей відбувається процес кондиціювання металу. При цьому активна речовина добавки Roil Gold взаємодіє з іонами заліза поверхонь деталей. На поверхні утворюється граничний захисний шар з високою, порівняно з алмазом, молекулярною міцністю і легким зсувом. При цьому джерела тертя екрануються, зменшується тертя і знос і підвищується задиростійкість тертьових поверхонь. Енергія, яка раніше витрачалась на нагрівання поверхні і руйнування, тепер використовується на постійне відновлення поверхонь тертя. При цьому знижується тертя, температура нагріву і знос деталей і зменшується витрата палива [3].

Так, наприклад, при експлуатації автомобіля Nissan з технічною добавкою Roil Gold в системі мащення і живлення витрата палива зменшилась з 14 до 6,5 л. При експлуатації автомобіля «Нива» в міських умовах без технічної добавки витрата палива склала 12 л/100 км. Після обробки олив автомобіля технічною добавкою Roil Gold машина поступово знизила витрату палива до 10 л в міському режимі руху, що склала 17% економії палива. Roil Gold був залитий не тільки в двигун, але і в мости «Ниви», в коробку передач і роздавальну коробку, які почали працювати із зменшеним тертям і опором коченню. На автомобілі Mazda-6 при використанні Roil Gold витрати палива зменшилась з 13 до 9 л/100 км при пробігу до 100000 км. На автомобілі Ніссан Прем'єра витрата дизельного палива складала 13 л/100 км. При заливанні технічної добавки Roil Gold в двигун витрата палива склала 8 л/100 км.

У випадку з Roil Gold - кондиціонером металу олива виконує лише транспортну функцію, а кондиціонер вступає у реакцію з металом. Так триває до терміну пробігу 100000 км. Потім потрібна нова порція кондиціонера металу, що збільшить ресурс двигуна і витрату палива щонайменше на 10%.

Відома також технічна добавка Мега Форс науково-виробничого об'єднання «МЕГАФОРС». Ця добавка є наномодифікатором тертя – силікатнофулеренова композиція, котра відноситься до ревіталізантів. При обробці поверхні утворюється металосилікатний шар. Також добавка є ефективна при обкатці двигунів, при експлуатації автомобіля в екстремальних і важких умовах експлуатації, при запуску двигуна за низьких температурах, при аварійному русі автомобіля вона зменшує витрату палива.

Технічні добавки «Нанопротек» до олив - молекулярна наноструктурна система, що забезпечує зменшення витрати палива на 5…10%, а також збільшення ресурсу агрегатів у два-три рази і зменшення витрати оливи.

Технічна добавка до оливи Nanoprotec - це молекулярна наноструктурна система, що забезпечує зменшення витрати палива. Модифікований шар за технологією Nanoprotec захищає поверхню тертя у випадку аварійної втрати оливи на період, достатній для виявлення даної аварії. Додавання мінерального антифрикційного композиту Nanoprotec до оливи М-12$Г_2$к збільшує граничне навантаження до утворення задиру на 40%. Застосування Nanoprotec в двигуні 2 ч. 8.5/11 дало збільшення механічного ККД цього двигуна на 15-45%. На режимах 50-80% навантаження застосування технічної добавки Nanoprotec збільшує ефективний ККД двигуна та зменшує питому ефективну витрату палива на 8-11%. Вплив Nanoprotec на робочий процес двигуна є можливим внаслідок створення антифрикційного покриття з великою оливоутримуючою здатністю. Дослідження показали, що застосування антифрикційної добавки Nanoprotec не погіршує характеристик основного пакету присадок оливи, яка використовується в двигуні [10].

Технічна добавка «60000» (компанії «Алмей») з фулереном С 60 створює захисну плівку товщиною до 100 Нм, яка: захищає поверхні від термічної і окислювальної дій; зменшує тертя на 50…100% і зношування поверхонь тертя у 3 рази, а витрата палива зменшується на 5…10 %.

Відома також універсальна багатофункціональна технічна добавка для моторних і трансмісійних олив OZEROL MP-8 (ТУ У 16283425.002-98) Київського науково-виробничого підприємства «Adios», сумісна з усіма типами моторних і трансмісійних олив, яка забезпечує зниження витрати палива за рахунок зменшення втрат на тертя. Згідно вказаних вище технічних умов OZEROL MP-8 – прозора рідина від жовтого до темно-коричневого кольору густиною 0.95…1.1 г/см^3, кінематичною в'язкістю при 100^{0}С в межах 1.5…4 сСт та температурою спалаху в закритому тиглі не нижче 130^{0}С; клас небезпеки – III – IV [6]. Дана технічна добавка відноситься до класу анамегаторів – складних хімічних сполук, які разом із оливою утворюють в двигуні багатофункціональний конгломерат, здатний не лише подовжувати термін роботи стандартного пакета присадок, а й видаляти із системи мащення лак, нагар та шлам і під дією високих температур та тисків у місцях тертя відновлювати спрацьовані поверхні, тобто здійснювати структурну реконструкцію пар тертя. Анамегатори – це рідкі речовини, які проявляють свої властивості в умовах роботи двигунів внутрішнього згоряння. Анамегатори – це рідкі магніти, які володіють здатністю протидіяти стиканню деталей пар тертя, чим виключають механічне спрацювання та електрохімічну корозію. Основною властиві-

стю анамегаторів є сильна електромагнітна дія, що практично виключає спрацювання поверхонь тертя. У разі потрапляння в оливу анамегатор утворює на межі пар тертя надтонку плівку поверхнево-активних речовин з високою температурою руйнування та низьким коефіцієнтом тертя [7]. Його використання разом із технічною добавкою до палива Adizol Т-4 (ТУ У 20.5-16283425-010:2012) дає знижує витрату бензину. Технічна добавка до палива Adizol Т-4 згідно ТУ У 20.5-16283425-010:2012 – це безбарвна прозора рідина з питомою масою 0.8 – 0.95 г/см^3 при 20^{0}С, кислотним числом 3.5…5.5 pH, масовою часткою нелетких речовин 15% та температурою спалаху в закритому тиглі не нижче 15^{0}С. Витрата добавки Adizol Т-4 складає 0.065 см^3 на 1 л бензину та 0.17 см^3 на 1 л дизельного палива при допустимому відхиленні вказаної норми дозування до 10% - збільшення дози знижує ефективність дії даної технічної добавки. Добавка додається безпосередньо в заправний пістолет перед заправлянням автомобіля паливом. Дія анамегатора Т-4 полягає в переорієнтації молекул компонентів палива таким чином, що вони легше вступають в реакцію окислення, основні ланцюги молекул вуглеводнів подовжуються, а бічні розгалуження не можуть перетворюватися в гідропероксиди, що виключає першопричину детонації [8].

Відома також технічна добавка на основі нанотехнологій «МегаФорс» науково-виробничого об'єднання «МЕГАФОРС», яка зменшує витрату палива на 5% при експлуатації автомобіля в екстремальних і важких умовах експлуатації, при запуску двигуна за низьких температур [10].

За результатами стендових випробувань двигуна ВАЗ-2108 після трикратної обробки препаратом «Супротек» було отримано зниження витрати палива більш, ніж на 6.5% та приріст ефективної потужності на 4.5%. Спостерігається також зниження токсичності відпрацьованих газів за компонентами СО та СН, тобто підвищується повнота згоряння палива. Після обробки двигуна препаратом «Супротек» спостерігається зниження втрат на тертя на 30…35% в зоні малих частот обертання колінчастого вала двигуна та на 8…12% - в зоні великих обертів. Спостерігається також підвищення герметичності циліндро-поршневої групи (ЦПГ), що виражається в підвищенні компресії в циліндрах двигуна. Зменшення швидкості зносу деталей ЦПГ після застосування технічної добавки «Супротек» склало 30…45%, а підшипників колінчастого вала – 40…80% [11]. Технічна добавка «Супротек» також була використана для обробки двигуна великовантажного автомобіля Iveco, витрата оливи «на вигорання» якого до обробки становила 4л/1000 км, а після трикратної обробки даною технічною добавкою знизилась до 0.3 л/1000 км, а середня витрата палива знизилась на 15% [12]. Застосування технології «Супротек» будівельною фірмою «Земельная компания Жилинвест» на 29 одиницях техніки (автомобілі Урал, КамАЗ, ЗиЛ трактори, екскаватори, бульдозери, грейдери, електростанції) дало такі середньостатистичні результати: зниження затрат на капітальний ремонт техніки на 100% (ремонти відсутні), зниження затрат на технічне обслуговування - на 50% (вдвічі збільшено інтервал заміни моторної оливи), зниження середньої витрати палива - на 5%, а також зниження витрати оливи «на вигорання» на 80% [13].

Таким чином технічні добавки до олив забезпечують зменшення витрати палива рухомим складом нафтогазового технологічного транспорту.

Постановка задачі. Як відомо зниження витрати моторних олив і палива під час експлуатації нафтогазового технологічного транспорту є важливим чинником енергозаощадження і шкідливого впливу на екологію. Але вплив різних технічних добавок до олив та моторних палив для зменшення тертя і для стабілізації якості та забезпечення повноти їх згоряння недостатньо досліджувався. Тому це питання є актуальним і вимагає відповідних досліджень.

Матеріали та результати експериментальних досліджень. З метою дослідження впливу технічних добавок на витрату палива в двигунах були проведені експлуатаційні дослідження. Так, для дослідження впливу кондиціонера металу Roil Gold на витрату палива використано двигун з інжекторним впорскуванням для роботи на стисненому природному газі (СПГ) автомобіля Audi-100 з пробігом з початку експлуатації, рівним 338000 км. Цей двигун мав ефективну потужність, рівну 83 кВт при номінальній частоті 5200 хв$^{-1}$, і робочим об’ємом циліндрів, рівним 2 л.

Перед дослідженням проводилось технічне обслуговування автомобіля, а також промивання системи мащення двигуна промивною оливою ХАДО. Промивна олива зливалась, а двигун заправлявся напівсинтетичною оливою Leol SAE 10W-40 APJ SI/CG-4, що призначена для високофорсованих двигунів. Двигун знаходився в технічно справному стані. Методика використання кондиціонера металу Roil Gold була такою: двигун розігрівався до робочої температури; зливалася відпрацьована олива, промивною оливою промивався двигун, замінювався оливний фільтр; заливали в двигун 2-2,5 літра свіжої оливи SAE 10W-40 API SJ/CG-4; вливався кондиціонер металу Roil Gold у кількості 70 мл на один літр моторної оливи; у заправноу місткість системи мащення двигуна Audi-100, рівну 4 л, було влито 280 мл; додавалася олива до заправної норми (верхня мітка на масловимірювальному щупі); обов’язково одразу здійснювалась обробка всіх частин двигуна; для підтримання робочої кондиціонованої поверхні деталей в оптимальному працездатному стані при кожній подальшій заміні оливи додавалась технічна добавка в кількості 20 мл на один літр заправної оливи (всього на заправну ємність системи мащення 4 л – 80 мл технічної добавки.

Експлуатаційні дослідження витрати палива на автомобілі у випадку використання в двигуні моторної оливи без кондиціонера металу Roil Gold по серійному лічильнику витрати стисненого газу дали такі результати: на маршруті м. Тернопіль – м. Хмельницький (маршрут довжиною 118 км) – 8,1 л і на маршруті м. Хмельницький – м. Вінниця (маршрут довжиною 128 км) – 8,2 л. Експлуатаційний пробіг здійснювався в умовах першої категорії умов експлуатації на дорозі з сухим асфальтовим покриттям.

В експлуатаційних умовах на маршруті м. Тернопіль - м. Хмельницький на автомобілі Audi-100 отримана витрата стисненого природного газу (СПГ), рівна 6,2 л при використанні технічної добавки-кондиціонера металу Roil Gold. Експлуатаційний пробіг автомобіля з навантаженням один пасажир склав 118 км. Експлуатаційний пробіг на маршруті м. Хмельницький - м. Вінниця склав 128 км, а витрата СПГ – 6,3 л/100 км (при середній швидкості 80 км/год).

Окрім того, ці присадки і добавки не мають шкідливий вплив на довкілля.

Принцип дії Roil Gold полягає в тому, що активна речовина Roil Gold (галогенізовані вуглеводні) взаємодіють з іонами заліза поверхонь, після чого на поверхнях утворюється граничний захисний шар з твердістю алмазу. В результаті плями тертя екрануються, і зменшується коефіцієнт тертя і зношування, підвищується задиростійкість і зменшується витрата палива.

Експлуатаційні випробування автомобіля Audi 100 пробігом показали, що використання кондиціонера металу Roil Gold зменшує витрату стисненого природного газу на 20 % за рахунок зменшення тертя.

Одночасно для виявлення впливу технічної добавки до оливи OZEROL MP-8 (ТУ У 16283425002-98) на технічний стан двигуна і витрату палива, проведені експлуатаційні випробування автомобіля Mercedes Benz Sprinter 312 з пробігом з початку експлуатації, рівним 25000 км. Дизельний двигун має ефективну потужність, рівну 58 кВт за номінальної частоти 3800 $хв^{-1}$ із робочим об'ємом циліндрів, рівним 2,9 л. Заправна ємність системи мащення рівна 9,5 л. Використовувалась олива синтетична Mobil 1 SAE 10W/40, API CF, ACEA E7/E4 із специфікацією MB 228.5. Для стабілізації палива до нього додавалась технічна добавка «Адізол Т-4 ТУ У 20,5 – 16283425-010:2012».

Технічна добавка заливалась безпосередньо в маслозаливну горловину прогрітого двигуна. Через 5…6 хв роботи на мінімальних обертах холостого ходу двигун був готовий до експлуатації. Після пробігу 300…1000 км відбувалося очищення деталей і мастильної системи двигуна від лаку і нагару, відтак здійснювалась заміна мастила і фільтрів.

Після вторинного введення технічної добавки в свіже мастило кожні 30000 км спостерігалося: зниження витрати палива на 10 % (витрата 8 л на 100 км за I категорією умов експлуатації); збільшення потужності двигуна; зниження витрати оливи «на вигорання» у два рази (20 г на 1000 км).

Пробіг автомобіля з початку експлуатації до контрольної оцінки технічного стану склав 1600000 км за рахунок зменшення тертя і швидкості зносу деталей. За результатами експлуатаційних досліджень технічка добавка зменшує витрату палива на 10-15 %.

Одночасно для дослідження впливу технічної добавки до оливи OZEROL МП-8 використаний автомобіль Deawoo Lanos (бензиновий двигун D4LM510 з розподіленим впорскуванням робочим об'ємом 1.5 л, максимальна ефективна потужність якого 63 кВт при 5800 $хв^{-1}$, заправна ємність системи мащення, включаючи оливний фільтр – 3.75 л) з пробігом від початку експлуатації рівним 52000 км. Дослідження проводились за наведеною вище методикою, також разом із застосуванням технічної добавки до палива Т-4. Заміна оливи здійснювалася кожні 10000 км. Пробіг автомобіля на даний час складає 285000 км. Витрата палива в змішаному циклі на дорогах 1-ої категорії умов експлуатації зменшилась на 8% (отримане значення – 7.5 л/100 км).

Принцип дії можна пояснити так: технічна добавка покриває поверхні тертя шаром однойменно заряджених молекул речовини, створюючи «магнітну подушку», виключаючи сухе тертя і утворення пітингів зменшення витрати палива.

Таким чином, експлуатаційні дослідження довели, що використання технічних добавок до моторного масла зменшує витрату палива у двигунах на 10 … 20 % та збільшує ресурс у два рази для двигунів нафтогазового технологічного транспорту.

Результати цього дослідження щодо зменшення витрати палива шляхом використання технічної добавки до оливи OZEROL MP-8 і до палива Adizol T-4 впроваджені на станції технічного обслуговування автотранспортного підприємства 12629 м. Івано-Франківська.

Цікавим є розрахунок технічних добавок для нафтогазового технологічного транспорту, які застосовують в різноманітних системах змащування двигуна і механізмах (трансмісія, гідропідсилювач керма та ін.), незалежно від пакету добавок.

Проведемо розрахунок необхідної кількості технічних добавок для олив, які застосовують у нафтогазовому технологічному транспорті, на прикладі технічної добавки «Diamond Ozerol MP-10» [9] для:

– агрегатів для ремонту нафтопромислового устаткування;

– агрегатів для дослідження нафтових свердловин;

– бурильно-кранових машин;

– агрегатів для ремонту нафтогазових свердловин.

1. Розрахунок необхідної кількості вказаних технічних добавок для оливи проведемо для агрегатів, призначених для ремонту нафтопромислового устаткування, на прикладі агре-

Таблиця 1 – Результати розрахунку ефективності використання технічних добавок для агрегату АРОК-3938

Назва вузла	Необхідна кількість оливи, л	Необхідна кількість технічної добавки МР-8, $см^3$	Необхідна кількість технічної добавки МР-10, $см^3$	Вартість технічної добавки МР-8, грн	Вартість технічної добавки МР-10, грн
Двигун КамАЗ-7403.10	30,5	213,5	42,7	85,4	64,05
Система гідропідсилювача рульового керування	3,2	22,4	4,48	8,96	6,72
Картер коробки передач з дільником	12	84	16,8	33,6	25,2
Картер ведучого моста (переднього)	7	49	9,8	19,6	14,7
Картер ведучого моста (заднього)	7	49	9,8	19,6	14,7
Картер міжосьового диференціалу	1,2	8,4	1,68	3,36	2,52
Всього	60,9	426,3	85,26	170,52	127,89

Таблиця 2 – Результати розрахунку ефективності використання технічних добавок

Назва вузла	Необхідна кількість оливи, л	Необхідна кількість технічної добавки МР-8, $см^3$	Необхідна кількість технічної добавки МР-10, $см^3$	Вартість технічної добавки МР-8, грн	Вартість технічної добавки МР-10, грн
Двигун КамАЗ-740.50	28	196	39,2	78,4	58,8
Система гідропідсилювача рульового керування	3,6	25,2	5,04	10,08	7,56
Картер коробки передач з дільником	10	70	14	28	21
Картер ведучого моста (переднього)	7	49	9,8	19,6	14,7
Картер ведучого моста (заднього)	7	49	9,8	19,6	14,7
Картер міжосьового диференціалу	1,2	8,4	1,68	3,36	2,52
Всього	56,8	397,6	79,52	159,04	119,28

гату АРОК-3938 (Агрегат для ремонту та обслуговування качалок). Даний агрегат монтується на шасі автомобіля КамАЗ-43114 з двигуном КамАЗ-7403.10.

Всі агрегати для ремонту нафтопромислового устаткування, а саме: АНРВ-М, АОЭ-3949, 2АОП-М, ПС-1.6 (ПС-4.0), 2-АРПТ, УЕЦН (СТЭК), УЕЦН-59293, УЕЦН СТУ, СТЭ, АСДП монтуються на шасі автомобіля КамАЗ-43114 або КамАЗ-43118, що укомплектований тим же двигуном. Тому для всієї групи агрегатів розрахунки залишаються аналогічними.

2. Розрахунок необхідної кількості технічних добавок для агрегатів, призначених для дослідження нафтових свердловин, проведемо на прикладі агрегату ПКС-7 (Пересувна компресорна станція). Даний агрегат монтується на шасі автомобіля КамАЗ-63501, на якому встановлений двигун КАМАЗ-740.50.

Агрегат для дослідження нафтових свердловин ПКС-5Г-ГС також монтується на шасі автомобіля КамАЗ-63501, тому для даного агрегату розрахунки залишаються аналогічними.

Агрегати для для дослідження нафтових свердловин, а саме: ПКС-5.0, ПКС-5-3, ПКС-5ГСВ, АИС-1М(К),Л2СГ монтуються на шасі автомобіля КамАЗ-43114 або КамАЗ-43118, що укомплектований двигуном КамАЗ-7403.10. Тому для всієї групи агрегатів розрахунки залишаються аналогічними пункту 1.

3. Розрахунок необхідної кількості технічних добавок для оливи, яка використовується при роботі лабораторій ПЕЛ ХЗ, пересувної лабораторії ГРС, пересувної лабораторії ЕХЗ, пересувної лабораторії КИП є аналогічним пункту 1, так як ці лабораторії монтуються на базі автомобіля КамАЗ-43114, на якому встановлений двигун КамАЗ-7403.10.

4. Розрахунок необхідної кількості технічних добавок для оливи проведемо для бурильно-кранових машин на прикладі БКМ-516. Даний агрегат монтується на шасі автомобіля Ка-

Таблиця 3 – Результати розрахунку ефективності використання технічних добавок

Назва вузла	Необхідна кількість оливи, л	Необхідна кількість технічної добавки МР-8, $см^3$	Необхідна кількість технічної добавки МР-10, $см^3$	Вартість технічної добавки МР-8, грн	Вартість технічної добавки МР-10, грн
Двигун КамАЗ-740.11	33	231	46,2	92,4	69,3
Система гідропідсилювача рульового керування	4,2	29,4	5,88	11,76	8,82
Картер коробки передач з дільником	8,5	59,5	11,9	23,8	17,85
Картер ведучого моста (переднього)	7	49	9,8	19,6	14,7
Картер ведучого моста (заднього)	7	49	9,8	19,6	14,7
Картер міжосьового диференціалу	1,4	9,8	1,96	3,92	2,1
Всього	61,1	427,7	85,54	171,08	127,47

Таблиця 4 – Результати розрахунку ефективності використання технічних добавок

Назва вузла	Необхідна кількість оливи, л	Необхідна кількість технічної добавки МР-8, $см^3$	Необхідна кількість технічної добавки МР-10, $см^3$	Вартість технічної добавки МР-8, грн	Вартість технічної добавки МР-10, грн
Двигун КамАЗ-740.30	26	182	36,4	72,8	54,6
Система гідропідсилювача рульового керування	3,7	25,9	5,18	10,36	7,77
Картер коробки передач з дільником	12	84	16,8	33,6	25,2
Картер ведучого моста (переднього)	7	49	9,8	19,6	14,7
Картер ведучого моста (заднього)	7	49	9,8	19,6	14,7
Картер міжосьового диференціалу	1,0	7	1,4	2,8	2,1
Всього	56,8	397,6	79,52	159,04	119,28

мАЗ-4326, на якому встановлений двигун КамАЗ-740.11.

Бурильно-кранові машини УРБ-2А2Д, БКМ-1514, АЗА-3, ПБУ-2, ЛБУ 50-02 монтуються на шасі автомобіля КамАЗ-43114, що укомплектований двигуном КамАЗ-7403.10. Тому для всієї групи агрегатів розрахунки залишаються аналогічними пункту 1.

5. Для агрегатів, які призначені для ремонту нафтогазових свердловин, розрахунок необхідної кількості технічних добавок для оливи проведемо на прикладі агрегату УПА-60А (Установка підйомна для освоєння і ремонту нафтових і газових свердловин). Даний агрегат монтується на шасі автомобіля КамАЗ-6540, на якому встановлений двигун КамАЗ-740.30.

Всі агрегати для ремонту нафтогазових свердловин АПРС-40К, УРГ-32, УНБ-160х32, СИН-31, СИН-34, АС-40, УС-4, УС-50-К, ППУ-1600/100, УПГМ монтуються на шасі автомобіля КамАЗ-43114 або КамАЗ-43118, що укомплектований двигуном КамАЗ-7403.10. Тому для всієї групи агрегатів розрахунки залишаються аналогічними пункту 1.

Висновок. Виконаний розрахунок необхідної кількості технічних добавок до оливи двигунів і агрегатів дозволить провести широкі експлуатаційні випробування установок нафтогазового технологічного транспорту при визначених затратах на технічні добавки.

Література

1 Шурденко С.И. Присадки к топливу [Текст]/ С.И Шурденко. – Мариуполь: Зоря, 2002. – 24 с.

2 Масла, смазки, ревитализанты. Каталог [Текст]. – Харьков: Хадо,2008 – 143 с.

3 Шурденко С.И. Обзор семинара [Текст] / С.И. Шурденко // Автохимия. – Мариуполь: Заря, 2004. – 22 с.

4 Горючее, смазочные материалы. Энциклопедический толковый словарь-справочник [Текст] / [под ред. В.М. Школьникова]. – М.: Техинформ, 2007. – 545 с.

5 Присадка «60 000» [Електронний ресурс]: http://www.almay-nano.com.ua/production.

6 Анамегаторы масел [Електронний ресурс]: http://www.adioz.com.ua/?m=362.

7 Об анамегаторах [Електронний ресурс]: http://www.adioz.com.ua/?m=16.

8 Анамегаторы и анакляриды [Електронний ресурс]: http://www.adioz.com.ua/?m=303.

9 Нанопротек: расчет экономии [Електронний ресурс]: http://www.nanoprotec.ua/pages/28.

10 Нанотехнология «Мегафорс» [Електронний ресурс]: http://www.megaforce.net.ua.

11 Акт испытаний технологии «Супротек» на автомобиле IVECO [Електронний ресурс]: http://www.suprotec.ru/index.php.

12 Акт испытаний СК «Супротек» на автомобиле IVECO [Електронний ресурс]: http://www.suprotec.ru/index.php?id=205.

13 Акт испытаний технологии «Супротек» на 29 единицах автотранспортной техники [Електронний ресурс]: http://www.suprotec.ru/index.php?id=393.

Стаття надійшла до редакційної колегії 23.01.13
Рекомендована до друку професором ***Петриною Ю.Д.*** *(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)*
професором ***Мельником П.І.*** *(Прикарпатський національний університет ім. В. Стефаника, м. Івано-Франківськ)*

Виробничий досвід

УДК 622.276

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ПРИПЛИВУ ВУГЛЕВОДНІВ НА РОДОВИЩАХ НГВУ «БОРИСЛАВНАФТОГАЗ» І ОЦІНКА КОЕФІЦІЄНТА НАФТОГАЗОВИЛУЧЕННЯ

В.Р. Возний, О.В. Дудра

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 42195,
e-mail: p u b l i c @ n u n g . e d u . u a

На продуктивність всіх свердловин значною мірою впливає спосіб первинного розкриття бурінням продуктивних горизонтів. Стан привибійної зони експлуатаційних свердловин погіршується через відкладання смол, парафінів і асфальтенів, а в нагнітальних свердловинах – через механічні домішки з води, продукти корозії і солі.

Для підвищення продуктивності розкритих пластів застосовують сучасні методи інтенсифікації.

Коротко описано суть вітчизняних і зарубіжних методів інтенсифікації припливів пластових флюїдів і очищення привибійної зони. Прокласифіковано методи за принципом роботи на механічні, хімічні, теплові та комбіновані.

Проведкно аналіз гірничо-геологічних умов залягання продуктивних горизонтів, складу гірських порід, які впливають на вибір методу інтенсифікації і його економічні показники. Економічні показники включають в себе чистий дохід і термін окупності витрат.

Описано і проаналізовано технології дії на при вибійну зону нафтових свердловин родовищ Бориславське, Східницьке, Новосхідницьке, Стрільбицьке, Старосамбірське, Заводівське, Орів-Уличнянське, Мельничинське, Верхньомасловецьке, Коханівське нафтогазовидобувного управління «Бориславнафтогаз».

Оцінено поточний коефіцієнт нафтовилучення з усіх перелічених вище родовищ. Підраховано кількість видобутих запасів нафти і здійснено їх порівняння із затвердженими запасами.

Ключові слова: пласт, забруднення, родовище, очищення, депресія, репресія, розрив, реакції, вплив.

На производительность всех скважин в значительной мере влияет способ первичного вскрытия бурением продуктивных горизонтов. Состояние призабойной зоны эксплуатационных скважин ухудшается вследствие отложения смол, парафинов, асфальтенов, а в нагнетательных скважинах - механических примесей из воды, продуктов коррозии и солей.

С целью повышения производительности раскрытых пластов используют современные методы интенсификации.

Кратко изложена суть отечественных и зарубежных методов интенсификации притоков пластовых флюидов и очистки призабойной зоны. По принципу работы методы разделяют на механические, химические, тепловые и комбинированные.

Проведено анализ горно-геологических условий залежей продуктивных горизонтов, состава горных пород, влияющих на выбор метода интенсификации и его экономические показатели. Экономические показатели включают в себя чистый доход и срок окупаемости затрат.

Описаны и проанализированы технологии воздействия на призабойную зону нефтяных скважин месторождений Бориславское, Схидницкое, Новосхидницькое, Стрильбицькое, Старосамборское, Заводивское, Орив-Уличнянское, Мельничинское, Верхньомасловецкое, Кохановское нефтегазодобывающего управления «Бориславнафтогаз».

Оценен текущий коэффициент нефтеизвлечения из всех вышеперечисленных месторождений. Посчитано количество извлекаемых запасов нефти и совершены сравнение с утвержденными запасами.

Ключевые слова: пласт, загрязнение, месторождение, очистка, депрессия, репрессия, разрыв, реакции, влияние.

The method of primary drilling into oil and gas bearing formations has the major effect on the flow rate of the well. Tar, paraffin, and asphaltene accumulations aggravate the bottoms of production wells in the formation zone, whereas mechanical water impurities, corrosion products and salts aggravate the bottoms of injection wells.

Modern intensification methods are used to increase recovery in the developed formations. The work briefly describes the essence of Ukrainian and foreign intensification methods of fluid influx and cleaning out the bottom-

hole zone. According to the operation principle, all these methods are classified into mechanical, chemical, thermal and combined.

The paper analyzes mining and geological conditions of bedding plane of oil or gas bearing reservoirs and rock structures that effect the choice of an intensification method and its economic indicators, namely net profit and payback time.

The technology influence on the bottom-hole zone is exemplified by the following oil sites that belong to the oil and gas company "Boryslavnaftogaz": Boryslav, Skhidnytsia, Nova Skhidnytsia, Strilbychi, Staryi Sambir, Zavodivsk, Oriv-Ulychne, Melnyky, Verhnomaslovske, Kohanivka.

The current rate of oil recovery from the above mentioned fields was evaluated. The amount of oil extracted was compared with the amount of oil estimated.

Key words: formation, contamination, field, clarification, depression, repression, fracture, reaction, influence.

Постановка проблеми. Стан привибійної зони свердловини має визначальний вплив на продуктивність розкритих пластів. Дослідженнями свердловин при стаціонарних і нестаціонарних режимах фільтрації встановлено, що після закінчення бурінням і освоєнням їх продуктивність знижується в середньому удвічі тобто коефіцієнт продуктивності свердловин становить 50% від коефіцієнта продуктивності гідродинамічно досконалої свердловини. Це зумовлено наявністю фільтрату і твердої фази, що потрапляють в пори продуктивного пласта із бурового розчину. Погіршення стану привибійної зони пласта у видобувних свердловинах зумовлено відкладеннями смол, парафінів, асфальтенів і солей, а у нагнітальних свердловинах – відкладеннями солей, механічними домішками з води та продуктами корозії. Відкладення солей у нагнітальних свердловинах відбувається внаслідок несумісності запомпованої і пластової вод. Ці всі чинники призводять до зменшення дебіту свердловини. При значному зменшенні дебіту свердловини виникає необхідність у дії на привибійну зону пласта. Досвід розробки родовищ свідчить, що дебіт свердловини можна значно підвищити за рахунок інтенсифікації припливу пластових флюїдів.

Методи інтенсифікації припливу до свердловини. Сучасні способи інтенсифікації припливу вуглеводнів до вибоїв свердловин є ефективним методом збільшення їх поточної продуктивності і суттєво впливають на коефіцієнт нафтогазоконденсатовилучення. Способи інтенсифікації застосовують на всіх етапах експлуатації свердловин, починаючи від закінчення бурінням та освоєнням до завершення їх експлуатації наприкінці розробки родовища. Такі способи розроблені для різноманітних гірничо-геологічних умов: глибокого, надглибокого чи неглибокого залягання продуктивних пластів, високих або низьких пластових тисків, високих або низьких пластових температур, карбонатних або піщаних колекторів, тріщинуватих, високопористих або низькопористих колекторів, за умов насичення пластів різними типами вуглеводнів та вод. Саме гірничо-геологічні умови визначально впливають на використання тих чи інших способів інтенсифікації. Значний вплив на їх вибір мають також економічні показники їх застосування – чистий дохід і термін окупності витрат. За характером дії на привибійну зону пласта усі методи поділяють на чотири види.

Механічні. Вони спрямовані на розширення існуючих і утворення нових тріщин в привибійній зоні пласта. Їх використовують у щільних низькопроникних колекторах. Найпоширенішими із них є ГРП, ПГРП, вібраційна обробка свердловин, торпедування, перфорація, очищення привибійної зони шляхом створення миттєвих депресій-репресій.

Вторинне розкриття продуктивних пластів здійснюють різними способами перфорації: кульовою (КлП), кумулятивною (КП) і гідропіскоструминною (ГПП). Під час перфорації утворюються канали, через які здійснюється приплив пластових флюїдів з пласта, що проходять через експлуатаційну колону і цементне кільце. Перфорація характеризується щільністю, розмірами і чистотою каналів. Перфорація є елементом конструкції вибою свердловини, від якого значно залежить дебіт, тому дуже важливо обґрунтувати проектне значення коефіцієнта гідродинамічної досконалості свердловини за характером розкриття пласта перфорацією. Найефективнішим способом є ГПП. При ГПП утворюються канали, що проходять через колону труб, цементне кільце й заглиблюються в породу під дією кінетичної енергії сформованого в насадках струменя рідини з піском. Канали, які можуть бути горизонтальними, похилими чи мати форму щілин, проходять через обсадну колону і цементне кільце, а потім проникають у породу на глибину від 100 до 300 мм. Довжина і поперечний переріз залежать від режимів різання. Для утворення каналів ГПП, більших від одержуваних під час КП, застосовують інтенсивні параметри здійснення процесу. Довжина каналу збільшується на 30% у випадку використання насадок діаметром 6,0 мм замість 4,5 мм, на 30…50% – при розгазуванні рідини азотом, на 40% – при зростанні перепаду тиску у насадках від 20 до 40 МПа. Якщо час формування каналу збільшити від 20 до 60 хв, то його довжина повільно зростатиме на 20%, а поверхня фільтрації – на 400% (тобто значно інтенсивніше). При одночасному застосуванні згаданих засобів довжина каналу може збільшитись у два-три рази. Проте не слід забувати, що ГПП технічно складний процес, тому технологічні переваги ГПП можуть бути ефективно використані у нафтогазовидобутку тільки за вмілого і раціонального планування його з урахуванням очікуваного додаткового видобутку вуглеводнів і витрат на його проведення. ГПП застосовують здебільшого в розвідувальних свердловинах, у свердловинах з багатоколон-

ною конструкцією, з тріщинуватими колекторами, а також під час капітального ремонту свердловин, особливо для повторної перфорації після ізоляційних робіт.

Проблема збереження природної проникності стінок перфораційних каналів і збільшення їх довжини набуває особливого значення під час розкриття глибокозалягаючих пластів з ущільненими колекторами і горизонтів з пластовим тиском нижче гідростатичного. Такі умови спостерігаються зазвичай в старих облаштованих нафтових районах: при розвідувальному бурінні на великих глибинах, при поверненні на залягаючи вище об'єкти багатопластових родовищ. З усіх відомих і застосовуваних способів перфорації цим вимогам як найповніше відповідає газогідропіскоструминна перфорація (ГГПП). ГГПП відрізняється від звичайної ГПП тим, що до рідини додають газову фазу, найчастіше газифікований біля свердловини азот. Після додавання газу в струмінь рідини початкова швидкість газорідинної суміші збільшується порівняно з чистою рідиною, а з віддаленням від насадки повільно спадає. На 30% збільшується довжина каналу ГГПП порівняно із довжиною каналу ГПП, а його об'єм на 200%. Під час ГГПП створюється додатковий перепад тиску на насадках і зменшується протитиск на пласт. Серед недоліків слід назвати труднощі, пов'язані із транспортуванням рідкого азоту до свердловини і його високу вартість. За результатами досліджень видно, що за рахунок додавання газу (азоту) в пульпу рідини з піском можна значно (у два-три рази) збільшити довжину каналу. Водночас газогідропіскоструминна перфорація має чимало інших переваг порівняно зі звичайною гідропіскоструминною перфорацією. Під час проведення ГГПП створюється додатковий перепад тиску на насадках за рахунок різниці густини газованої суміші в насосно-компресорних трубах (НКТ) і в затрубному просторі, який збільшується зі зростанням глибини свердловини. При додаванні азоту виникають реальні можливості застосування ГГПП з більшою глибиною залягання перфорованих пластів, оскільки компенсуються зростаючі гідравлічні втрати в трубах. Дуже важливим фактором при проведенні процесу інтенсифікації є створення тиску в свердловині, значно меншого від гідростатичного, що легше досягнути при використанні ГГПП. Завдяки цьому можна уникнути забруднення перфораційних каналів і проникнення в пласт інших рідин, а також при розкритті об'єктів із зниженим пластовим тиском. Тому одночасно із розкриттям пласта може бути викликаний приплив пластових флюїдів, тобто можливе постійне дренування свердловини. Наявність газовиявів сприяє ще більшому розгазуванню стовбура в затрубному просторі і, відповідно, стимулює приплив із пласта.

Метод миттєвих депресій-репресій використовується за наявності тріщинних колекторів, які в процесі їх розбурювання закупорюються твердою фазою, і тріщини перестають бути флюїдопровідними. Суть методу полягає у створенні в привибійній зоні пласта змінних тисків – спочатку створюється надлишковий тиск, а при руйнуванні діафрагми він миттєво знижується. За рахунок інерційних ефектів це зниження тиску є значно меншим за величиною від гідростатичного тиску. При створенні великих надлишкових тисків стінки тріщин розкриваються, сприяючи надходженню в них робочої рідини, а при миттєвому зниженні тиску виникає великий градієнт тиску з боку пласта в свердловину, що приводить до великої швидкості припливу рідини в свердловину. Ця рідина виносить у свердловину тверду фазу, очищаючи тріщини. Таким чином, один цикл дії на пласт складається з нагнітання в тріщини під тиском робочої рідини і різкого зменшення тиску на вибій свердловини. Число циклів дії на пласт – від до 150 і вище. Процес супроводжується періодичним зворотним промиванням для винесення з вибою механічних домішок. Під час проведення процесу здійснюється аналіз робочої рідини з визначенням кількості домішок, які підіймаються нею з вибою.

Суть віброударного впливу на пласт полягає в наступному. За рахунок створення поздовжніх і поперечних віброударних хвиль внаслідок втомних явищ відбувається утворення системи дрібних тріщин в привибійній зоні. Вібровпливу піддається також рідина, яка знаходиться в пласті. Внаслідок зменшення в'язкості рідини і сил зчеплення її з породою покращуються умови руху рідини з пласта до вибою свердловини і покращуються умови винесення твердих частинок у свердловину. Віброударний вплив рекомендується проводити в свердловинах, де розкриті пласти з високими тисками, але які є літологічно неоднорідними та мають низьку проникність. Для проведення віброударного впливу на пласт використовуються гідравлічні вібратори, які опускають у свердловину на насосно-компресорних трубах. Гідровібратори здатні виробляти 2500-3000 ударів за хвилину. Новою модифікацією віброударного впливу на пласт є застосування гідромолотів, які встановлюються на поверхні свердловини і за допомогою яких передається на вибій верхня або нижня частина синусоїди.

Ударно-хвильовий вплив на продуктивні пласти припускає два види ефектів: безпосередній хвильовий вплив на привибійну зону оброблюваної свердловини і віддалену дію, що спостерігається на відстанях до 1…1,5 км від джерела пружніх хвиль. Ефекти ближньої дії виявляються в очищенні привибійної зони й зумовлені інтенсивністю пружних хвиль поблизу джерела. Ефекти далекої дії зумовлюють збільшення потоків нафти і відповідно зниження обводненості, що пояснюється процесом вивільнення пружної енергії, яка накопичується як у самому пласті, так і в породах, що його оточують. Остання накопичується внаслідок зміни порового тиску у пласті і пов'язаною з цим зміною у напружено-деформованому стані гірського масиву. Отримані технологічні показники свідчать про високу ефективність впливу на малодебітні свердловини з низькими колек-

торськими властивостями, що полягає не тільки у збільшенні дебіту свердловин, але й в істотному зниженні обводненості. Наприклад, результати практичного застосування технологій свідчать про збільшення дебіту й зниження обводненості на свердловинах від 2 до 10 разів. Тривалість ефекту зниження обводненості після ударно-хвильового впливу характеризує радіус зони активізації нерухомих і малорухомих запасів нафти. Як джерело ударно-хвильового впливу використовують електророзрядні й акустичні свердловинні пристрої. Основу технології впливу на привибійну зону ультразвуком становлять: термоакустичний вплив, ультразвуковий капілярний ефект та гравітаційні ефекти. Під дією теплового поля в привибійній зоні відбувається розрідження парафіносмолистих відкладів. Вплив акустичного поля на рідку фазу в привибійній зоні полягає у виникненні в ній знакозмінних (стискування-розтяг), швидкоплинних високих градієнтів тиску, значення яких є достатнім для руйнування просторової структури і пограничних шарів рідини на поверхнях порових каналів. Ультразвуковий капілярний ефект збільшує глибину охоплення й інтенсивність обробки привибійної зони хімічними реагентами. Гравітаційні ефекти, що виникають у високоінтенсивному акустичному полі, зумовлюють очищення привибійної зони від механічних домішок, глинистого розчину та солей.

Гідравлічний розрив пласта (ГРП) – це метод утворення в пласті нових або розширення і розвиток деяких існуючих тріщин при нагнітанні в свердловину рідини або піни за високого тиску. Для того, щоб новоутворені тріщини були добрими провідниками флюїдів і мали велику проникність, їх заповнюють закріплюючим агентом, наприклад, кварцевим піском. Під дією гірничого тиску заповнені кварцевим (або штучним) піском тріщини повністю не змикаються, завдяки чому збільшується фільтраційна поверхня свердловини. Іноді включаються в роботу зони пласта з кращою проникністю. ГРП можна здійснювати і без закачування розклинюючого матеріалу, однак ефект від такого оброблення буде значно меншим і короткочасним. Проведення ГРП можливе в майже будь-яких породах, краще в міцних малопроникних і щільних тріщинуватих вапняках або доломітах, за винятком пластичних сланців та глин. ГРП можна проводити на будь-яких свердловинах, якщо поклад працює у газовому режимі. Якщо ж на покладі спостерігається рух газоводяного контакту (ГВК), то на всіх свердловинах крайнього ряду ГРП не проводять. На покладах водоплаваючого типу при виборі свердловин для ГРП треба враховувати відстань до ГВК. Вище покрівлі продуктивного пласта, в якому намагаються провести ГРП, встановлюють пакер, який ізолює кільцевий простір і колону від тиску, а також пристрій, який запобігає переміщенню пакера, – якір. Спущеною колоною НКТ спочатку нагнітають рідину розриву в таких об'ємах, щоб отримати на вибої свердловини тиск, який достатній для розриву пласта. В момент розриву на поверхні спостерігається різке збільшення витрати рідини за того ж тиску на усті або різке зменшення тиску на усті свердловини за тієї ж витрати. Після розриву пласта в рідину напомповують рідину-піскоиосій за тисків, які утримують в пласті тріщину в розкритому стані, щоб при наступному знятті тиску тріщина залишилась у відкритому стані. Рідиною-піскоиосієм, як правило, є більш в'язка рідина з піском. Далі запомповують притискувальну рідину, яка проштовхує рідину-піскоиосій. Цей метод служить не для відновлення природньої проникності порід, а до їх значного збільшення. Вперше в Україні ГРП провели на Бориславському нафтовому родовищі в 1954 р.

Хімічні. В основу цих методів покладено дію на породи привибійної зони пласта різних кислот з метою розчинення частин, які забруднюють порові канали, а також для збільшення поперечних розмірів порових каналів. Їх застосовують тоді, коли пласт складений карбонатними породами. До хімічних відносять методи: глинокислотну, пінокислотну, азотокислотну обробки, СКО та інші її різновиди.

Обробки хлористоводневою кислотою (СКО) застосовують переважно для впливу на карбонатні породи й породи, які мають у своєму складі карбонатні цементи. На ефективність солянокислотної обробки впливає чимало чинників, серед яких основними є хіміко-мінералогічний склад породи, властивості рідини, які насичують породу, пластові температури і тиск, об'єм та концентрація кислотного розчину, час реагування кислоти з породою. Щоб зменшити корозію труб під час транспортування через них кислот, застосовують різні інгібітори.

Сірчана кислота, наявна в кислотному розчині, може у випадку взаємодії з карбонатними породами утворювати гіпс, і хоча він розчиняється в соляній кислоті, в поровому просторі можуть залишатися кристали гіпсу, що погіршує проникність пласта. Для зменшення вмісту сірки кислотний розчин можна обробляти хлористим барієм.

Оцтова кислота, добавлена в соляну, бере участь у процесі обробки і виконує декілька функцій:

– сповільнює взаємодію соляної кислоти з породою (сповільнювач),

– запобігає випаданню оксидів заліза (стабілізатор),

– взаємодіє з породою, розчиняючи її (активний реагент).

Фтористоводневу кислоту застосовують для обробки привибійної зони пластів з теригенними колекторами (кварцові пісковики, алевроліти) для розчинення силікатних і глинистих частинок, які містяться в породі, або які потрапили в неї з глинистого розчину.

Плавикова кислота в чистому вигляді зазвичай не застосовується, але використовується в суміші із соляною. Цю суміш називають глинокислотою. Її транспортують у ємкостях із ебоніту або покритих свинцем, парафіном, воском; ця кислота шкідлива для людей.

Для обробки пісковиків із незначною кількістю карбонатного цементу використовують глинокислоту – суміш хлористоводневої та фтористоводневої кислот. Розкладання сумішшю фтористоводневої та соляної кислот породоутворюваних алюмосилікатів і розчинення кварцу зумовлюють утворення розчинних солей кремнієфтористоводневої кислоти, хлористих і фтористих солей металів, кремнієвої кислоти. Остання в кислому середовищі здебільшого перебуває у вигляді гелю, але з досягненням певної концентрації або внаслідок повної нейтралізації може перетворитись у гель, який міцно закупорює поровий простір пласта. При проектуванні процесів обробки свердловини глинокислотою необхідно це врахувати. Технологічні схеми здійснення процесу обробки пластів глинокислотою не відрізняються від схем солянокислотної обробки. До особливостей деяких процесів належать проведення спочатку кислотної обробки, а потім обробки глинокислотою. Кислотна обробка, розчиняючи карбонатні матеріали, сприяє більш ефективному використанню глинокислоти і запобігає утворенню гелю кремнієвої кислоти. Замість плавикової кислоти можна використовувати одну із її сполук – біфторид амонію – це кристалічна сіль, яку можна транспортувати у мішках з поліетилену та крафтпаперу. Ця властивість вигідно відрізняє його від плавикової кислоти, яку потрібно зберігати і транспортувати в свинцевому або бакелітовому посуді. У складі біфториду амонію міститься 25%HF, він розчиняється у воді і кислотах, вступає в реакцію з силікатними породами й повністю розчиняє їх, також повністю розчиняє вапняки, хоча при цьому утворюється осад із фторидів кальцію та магнію. Домішка 16% біфториду амонію до 12%-ної соляної кислоти знижує корозійну активність її в чотири рази. Введення ПАР сприяє подальшому зниженню корозійної здатності. Суміш 12%-ної HCl біфториду амонію і 0,3% катапіну А має корозійну активність в 53 рази меншу, ніж 12% HCl. Отже, сам біфторид амонію має слабкі інгібуючі властивості, зате добре поєднується з іншими інгібіторами. Промислова практика свідчить, що пласти доцільно обробляти із застосуванням біфториду амонію.

Сульфамінову кислоту випускають у вигляді порошку. У чистому вигляді – це білі негігроскопічні кристали, густина яких 2130 кг/м^3, температура плавлення – +205^{o}C. Сульфамінова кислота менш активна у взаємодії з карбонатами і менш корозійно активна, ніж соляна кислота. Лабораторні дослідження підтверджують, що активність її в п'ять разів нижча, ніж у соляної. Обробка пластів сульфаміневою кислотою здійснюється за технологічною схемою, прийнятою для солянокислотних обробок.

Ефект від обробки вуглекислотою досягають спочатку за рахунок очищення каналів у привибійній зоні при різкому збільшені швидкості руху рідини під час переходу вуглекислоти із рідинного стану в газоподібний. На привибійну зону пласта позитивно впливає здатність вуглекислоти вступати у взаємодію із карбонатними породами і розчиняти їх, розчинятись у рідинах і, зменшуючи їх в'язкість, розчиняти асфальтосмолисті осади. Все це зумовлює підвищення проникності привибійної зони пласта. Обробка вуглекислотою привибійної зони пласта доцільна під час проведення випробувань свердловин з низьким пластовим тиском, достатній проникності. Для свердловин з високим пластовим тиском краще використовувати соляну кислоту, дія якої на карбонатні породи значно ефективніша. В деяких випадках варто закачувати вуглекислоту разом з соляною кислотою для кращого очищення привибійної зони пласта. Вуглекислота сповільнює реакції соляної кислоти з породою. Це необхідно враховувати при плануванні обробки пласта сумішшю соляної кислоти та вуглекислоти.

Для інтенсифікації припливу ефективно використовувати пінокислотні обробки, під час яких у пласт закачують соляно-кислотний розчин з піноутворювачем. Для приготування пінокислотних розчинів застосовують соляну кислоту з концентрацією 10…15% і 20…25% залежно від типа колектора і його карбонатності. Вища карбонатність породи вимагає більш концентрованої кислоти. Спіненню піддають не тільки розчини соляної кислоти, але й суміші її з фторводневою. Для підвищення стійкості піни використовують стабілізатори. Із 10%-го розчину соляної кислоти найбільш стійку піну отримують при домішках 1% піноутворювача (синтанол МЦ) і 1,5% стабілізатора (КМЦ). Для керування кислотного розчину можна застосовувати повітря, азот, природний газ. Кислотна піна, приготовлена з використанням повітря, різко збільшує корозійну активність кислоти. Тому як газову фазу краще використовувати азот, природний газ або димові викидні гази. Для зниження корозійної активності кислоти застосовують піноутворювачі, які є одночасно інгібіторами, або спеціальні інгібітори. Наприклад, застосовуючи катапін А, карбозолін або марвелан КО з дозуванням 0,1…0,5% від об'єму кислотного розчину, можна не проводити інгібування. При використанні інших піноутворювачів в розчин додають 0,1 і 0,4% інгібіторів КІ-І і І-І-А відповідно. Особливістю технології закачування кислотної піни в пласт є використання ежектора, в який повітря подається компресором, а рідина – насосним агрегатом. За наявності компресорів високого тиску обходяться без ежектора. Використовуючи невеликі об'єми піни, її закачають в свердловину при відкритому затрубному просторі, а потім протискують у пласт рідиною, яку нагнітають насосним агрегатом.

Ефективність використання азотної кислоти і композицій на її основі полягає в тому, що і сама кислота, і продукти її реакції з породою пласта знижують в'язкість нафт зі значним вмістом асфальто-смолянистих речовин. Окрім цього, продукти реакції азотної кислоти з породою пласта здійснюють деемульгуючу дію на обводнену пластову нафту. Проте різні кислотні сполуки на основі азотної кислоти, як і чиста азотна кислота, надзвичайно сильні окисники.

Використання останньої для кислотних обробок зумовлює сильну корозію і руйнування елементів ущільнювачів і устаткування нафтопромислу. Для запобігання такій негативній властивості азотну кислоту перед помпуванням у свердловину переводять в неактивну форму – її комплекс з карбамідом, або, кажучи інакше, в її сіль – нітрат карбаміду. Нітрат карбаміду, що утворюється, є дрібнодисперсним нерозчинним у вуглеводневих рідинах продуктом, який випадає в осад. При розведенні водою відбувається руйнування нітрату карбаміду. Процес цей поступовий, тому поступове отримання азотної кислоти в пласті при руйнуванні нітрату карбаміду дає можливість збільшити глибину пласта при комплексній дії більше, ніж при дії чистою азотною кислотою, коли реакція відбувається в навколишній привибійній зоні. Іншим чинником, що сприяє збільшенню охоплення пласта кислотною обробкою, є те, що при руйнуванні комплексу шляхом розведення його водою, відбувається зниження концентрації та азотної кислоти в розчині. Таким чином, вибираючи той чи інший ступінь розведення можна регулювати й глибину охоплення продуктивного пласта кислотною дією. Необхідно також зазначити, що карбамід після руйнування комплексу в пласті подальшої участі в реакції не бере. Проте він не викликає і ніяких ускладнень, зважаючи на його високу розчинність у воді (104,7 г на 100г води при 20^{o}С). Окрім цього, він володіє здатністю поліпшувати змочуваність гірських порід, що, природно, підвищує ефективність кислотної дії при виділенні продуктів реакції з порового простору привибійної зони пласта.

Теплові. Ці методи основані на прогріванні привибійної зони пласта з метою розплавлення і видалення з неї асфальтенів, смол, парафінів. А також їх застосовують для зменшення в'язкості нафти. До найпоширеніших відносять закачування у привибійну зону пласта теплоносіїв (водяна пара, гаряча нафта) і нагрівання привибійної зони вибійними нагрівачами.

Роботи з теплового діяння запобігають утворенню чи усувають парафінисті та смолянисті відклади у поровому просторі пласта і сприяють підвищенню поточного і накопиченого видобутку нафти. Теплові діяння як загалом на нафтові поклади, так і зокрема на привибійні зони у видобувних свердловинах застосовуються в тих випадках, коли родовище містить нафту з високою в'язкістю і підвищеною густиною в пластових умовах, з великим вмістом парафіну, смол і асфальтенів. Видобувати таку нафту звичайними методами важко. Теплові методи діяння в поєднанні з хімічними та іншими методами в таких випадках дають добрі результати. Для діяння на нафтові поклади загалом застосовують теплові методи підвищення нафтовилучення. Суть таких теплових методів полягає в тому, що поряд із підтримуванням пластового тиску (із гідродинамічним витісненням нафти) здійснюється підвищення температури в покладі, що сприяє значному зменшенню в'язкості нафти, зростанню її рухомості, випаровуванню легких фракцій та ін. Об'єктами їх застосування є поклади високов'язкої смолистої нафти аж до бітумів, поклади нафти, яка характеризується неньютонівськими властивостями, а також поклади, початкова пластова температура яких дорівнює температурі насичення нафти парафіном або є близькою до неї. Високою в'язкістю характеризується відносно велика частина відомих запасів нафти у світі, причому спостерігається тенденція до її зростання. Інші методи розробки таких родовищ і підвищення нафтовилучення або непридатні до застосування, або не забезпечують достатньої ефективності. Теплове діяння на привибійну зону, окрім того, подовжує міжремонтний період роботи свердловин, оскільки завдяки постійному прогріванню знижується в'язкість нафти, локально підвищується її температура; у зв'язку з цим зменшується і кількість парафіну, що відкладається у привибійній зоні і частково на стінках ліфтових труб. Основним призначенням теплового діяння на привибійну зону пласта є відновлення проникності її за рахунок розплавлення і розчинення відкладеного на стінках фільтраційних каналів парафіну і адсорбційносольватних шарів активних компонентів нафти (смол, асфальтенів, органічних кислот). Промислова практика засвідчила, що на родовищах із в'язкою і важкою нафтою теплові методи діяння на привибійну зону сприяють збільшенню продуктивності свердловин за рахунок зниження в'язкості нафти і очищення фільтраційних каналів від асфальтено-смолистих, парафінових та інших відкладів. Суть теплового оброблення або термооброблення (ТО) полягає в прогріванні привибійної зони пласта і стовбура свердловини з метою розплавлення і видалення парафіно-смолистих відкладів на поверхню разом із видобуваною нафтою. Теплота може бути внесена локально в привибійну зону продуктивного пласта двома способами:

а) теплопередачею в пласт по скелету насиченої рідиною гірської породи від джерела теплоти (електронагрівача), котрий розміщений у свердловині в інтервалі продуктивного пласта (способом кондуктивного прогрівання стаціонарно або періодично);

б) конвективним тепломасоперенесенням за рахунок нагнітання у свердловину і далі в пласт теплоносіїв (насиченої або перегрітої водяної пари, гарячої води, нафти тощо).

Отже, продуктивний пласт в околі свердловини нагрівають двома способами: за допомогою нагрівача, розміщеного на вибої свердловини (електронагрівач, газовий пальник чи термоакустичний випромінювач), або запомповуванням теплоносія в пласт (насичена або перегріта водяна пара, гарячі вода, нафта або вуглеводневий розчинник, гаряча кислота). Найбільше розповсюдження на промислах отримали циклічне і стаціонарне електропрогрівання, термоакустичне і паротеплове діяння, а також діяння гарячою кислотою на привибійну зону. Кожний із цих методів має свою специфіку і область застосування, та властиві йому переваги і недоліки.

Спосіб кондуктивного прогрівання привибійної зони може здійснюватися або періодично в зупиненій свердловині (періодичний спосіб прогрівання свердловин) або стаціонарно в процесі її експлуатації (стаціонарний спосіб прогрівання свердловин). Основними перевагами кондуктивного способу є простота технології і, як правило, низька вартість. На відміну від інших методів оброблень, у привибійну зону не вносяться сторонні речовини, що можуть викликати незворотні негативні наслідки. До недоліків способу відноситься неможливість внесення в пласт значної кількості теплоти за короткий проміжок часу. Це зумовлено невисокими значинами ефективної теплопровідності гірських порід. У зв'язку з цим при кондуктивному прогріванні радіус прогрітої зони, як правило, не перевищує 1 м. Механізм кондуктивного теплового діяння за способом періодичного прогрівання привибійної зони зводиться до одноразового розтоплювання (розплавлення) парафінових і асфальтено-смолистих відкладів у привибійній зоні, які негайно (до остигання і затвердіння) слід видалити із пласта шляхом пуску свердловини в роботу. Але в процесі подальшої експлуатації свердловини знову відбувається охолодження пласта і відкладання парафіну, тому для відновлення проникності порід необхідно через деякий час проводити повторне оброблення привибійної зони пласта. Механізм кондуктивного теплового діяння за способом стаціонарного прогрівання привибійної зони зводиться до того, що в процесі експлуатації навколо свердловини в пласті створюється кільцева зона радіусом до 1 м, де стаціонарно підтримується достатньо висока температура. У цій зоні нафтопроникність колектора не знижується під час експлуатації свердловини (відсутні випадання і відкладання парафіну), а в'язкість нафти в деякій мірі є меншою від початкової (з підвищенням температури зменшується в'язкість). Як джерело теплоти для реалізації кондуктивного способу теплового діяння на привибійну зону пласта найчастіше застосовують глибинні електронагрівачі. У зв'язку з цим найбільш поширеними є періодичне електротеплове оброблення і стаціонарне електротеплове оброблення.

Для періодичного електротеплового оброблення (періодичного кондуктивного прогрівання) експлуатацію свердловини припиняють, витягують на поверхню підземне обладнання (НКТ, насос тощо) і на кабель-тросі в інтервал продуктивного пласта опускають свердловинний електронагрівач, яким прогрівають пласт в радіусі до 1-1,5 м протягом 3-7 діб, а відтак його піднімають, опускають свердловинне обладнання і відновлюють експлуатацію свердловини. Дослідні дані переконують, що через 3-7 діб безперервного прогрівання температура на вибої свердловини стабілізується. Вздовж стовбура свердловини нагріта зона поширюється на 20-50 м угору і на 10-20 м вниз від джерела нагрівання. Внаслідок малої теплопровідності порід вдається прогріти пласт вище від температури плавлення парафіну і асфальтено-смолистих відкладів на невелику глибину. Після вимкнення нагрівача вибійна температура знижується зі швидкістю 3-5^{o}С/год. Тому потрібно без зволікань негайно пускати свердловину в роботу. Оскільки привибійна зона досить інтенсивно охолоджується (темп охолодження 3-5^{0}С/год.), тривалості часу витягання електронагрівача зі свердловини і пускання свердловини в експлуатацію повинні бути мінімальними. В іншому разі розтоплені асфальтено-смолисті і парафінові відклади після зниження температури знову тверднуть, тож оброблення буде неефективним, тобто після припинення прогрівання свердловину необхідно ввести в експлуатацію раніше, ніж парафіно-смолисті компоненти знову затвердіють на стінках пор. Це накладає обмеження на область застосування методу за глибиною залягання пластів, котрі піддаються періодичному електропрогріванню: максимальна глибина 1500 м. Водночас зауважимо, що на глибинах понад 1500 м не спостерігається випадання парафіну в привибійній зоні. Ефект триває 3-4 місяці. Періодичне електротеплове оброблення привибійної зони за фактичними промисловими даними є достатньо ефективним методом підвищення дебітів видобувних свердловин, коли видобувається малов'язка та в'язка нафти і в привибійній зоні відбувається відкладання смол і парафінів.

Для стаціонарного електротеплового оброблення (стаціонарного кондуктивного прогрівання), яке здійснюється одночасно з експлуатацією свердловини, у свердловині в інтервалі продуктивного пласта разом із підземним обладнанням під час поточного ремонту встановлюють піднасосний стаціонарний електронагрівач, за допомогою якого здійснюють прогрівання пласта і який працює безперервно або періодично за заданим режимом у процесі відбирання нафти. Оскільки при цьому постійно підтримуються високі значини коефіцієнта нафтопроникності колектора і низькі значини коефіцієнта в'язкості нафти, для стаціонарного електротеплового оброблення придатні родовища зі смолистими або парафінистими (3-4%) і в'язкими (з коефіцієнтами в'язкості понад 10-50 мПа·с) нафтами за глибини залягання до 2500 м, в пластах товщиною не менше 3 м, хоч глибина свердловин у даному випадку не має значення і визначається лише роботопридатністю глибинного нагрівального обладнання (кабелю, електронагрівача). Ефективність процесу зумовлюється не тільки відновленням проникності в привибійній зоні за рахунок розчинення смоло-парафінових відкладів, але і зниженням в'язкості видобуваної рідини.

Суть методу оброблення теплоносієм (конвективне прогрівання) полягає в запомповуванні в пласт нагрітого теплоносія, який розтоплює або і розчиняє смоло-парафінові відклади в привибійній зоні з подальшим своєчасним (до охолодження) і достатньо повним вилученням його із пласта. Для оброблення краще використовувати вуглеводневі рідини, ніж воду (незважаючи на їх меншу теплоємність), оскільки вони суміщають функції теплоносія і вуглеводневого розчинника та не викликають негативних

побічних явищ (набухання глин, руйнування скелета гірських порід, зниження нафтопроникності). Як теплоносій для здійснення діяння на привибійну зону найбільш широко використовується насичена водяна пара. Прогрівання привибійної зони пласта шляхом введення в пласт теплоносія може бути здійснено на достатньо велику відстань у глибину пласта від свердловини (до 20 м). Однак, цей метод, як правило, призводить до значного обводнення продукції свердловин. Крім того, він може викликати небажані наслідки в привибійній зоні, наприклад, утворення всередині пласта стійких емульсій, водяних конусів, руйнування сипкого колектора, а також набухання ліофільних глин у пласті. Не рекомендується проводити паротеплове оброблення на заводнених ділянках покладу у зв'язку з великою витратою теплоти. Механізм діяння на колектор у випадку нагнітання теплоносіїв також зводиться до впливу на в'язкість нафти і нафтопроникність колектора. Однак, зниження в'язкості нафти зумовлюється не тільки температурним фактором, але й ефектом розрідження нафти гарячим конденсатом. Крім того, такий спосіб оброблення привибійної зони сприяє активному розчиненню парафіно-смолистих відкладів, розпушенню відкладів шламу і усуненню водних бар'єрів. У результаті нафтопроникність колектора не тільки відновлюється, але часто стає вищою, ніж на початку експлуатації свердловини. Після оброблення поверхня порових каналів ліофобізується (покривається плівкою гарячого конденсату), що в поєднані з тривалим збереженням у колекторі підвищеної температури дуже сповільнює механізм повторного накопичення парафіно-смолистих відкладів.

Паротеплове оброблення полягає в періодичному прогріванні привибійної зони шляхом нагнітання в пласт насиченої водяної пари. При цьому свердловину зупиняють, витягають на поверхню свердловинне насосне устаткування, і в продуктивний пласт нагнітають пару з таким розрахунком, щоб утворилася парова зона радіусом 10-20 м. Після цього свердловину герметизують і витримують протягом 2-3 діб. Вважається, що за цей період відбувається перерозподіл тиску і температури, а також капілярне просочення неохоплених впливом гарячого конденсату ділянок колектора. Для паротеплових оброблень придатні родовища глибиною до 1000 м, що містять нафту з динамічним коефіцієнтом в'язкості в пластових умовах понад 50 мПа·с. При цьому співвідношення в'язкостей у пластових умовах і за температури насиченої пари, що відповідає поточному пластовому тиску, повинно бути не менше 2-3. Якщо нафта родовища є малов'язкою, то вона повинна бути парафінистою (понад 4%), пластова температура повинна бути нижчою від температури початку кристалізації парафіну, а радіус області парафіно-смолистих відкладів у привибійній зоні повинен перевищувати 1 м. Якщо радіус області парафіно-смолистих відкладів є меншим від 1 м, то економічно доцільніше застосовувати електротеплове оброблення. Для паротеплового оброблення стовбура свердловини і привибійної зони пласта застосовують пересувне парове автомобільне устаткування типу ППУА-1600/100, яке змонтовано на шасі автомобіля високої прохідності. Його також застосовують для депарафінізації НКТ у свердловинах та викидних лініях.

Циклічне паротеплове оброблення полягає в періодичному нагнітанні в пласт насиченої водяної пари. Свердловину зупиняють, витягують на поверхню устаткування із свердловини і в продуктивний пласт запомповують пару з таким розрахунком, щоб утворилася парова зона радіусом 10-20 м. Свердловину закривають на 2-3 доби, а відтак вводять в експлуатацію. Ефект триває протягом 2-3 місяців. Циклічне паротеплове оброблення доцільне на родовищах із глибиною залягання продуктивних пластів до 1500 м, що містять нафти з динамічним коефіцієнтом в'язкості понад 50 мПа·с (за пластових умов). Під час паротеплового оброблення в'язкість нафти повинна знижуватися в 2-3 рази. Паротепловому обробленню можуть піддаватися і пласти, насичені малов'язкою нафтою, але з великим вмістом парафіну і асфальтено-смолистих компонентів (понад 4%), причому радіус зони відкладання парафіну в пласті повинен бути більше 7-8 м. У разі меншого радіусу зони відкладення парафіно-смолистих речовин доцільніше застосовувати інші теплові методи. Товщина пласта повинна бути не менше 5 м, а пластовий тиск – в 1,5-1,7 рази нижчим від робочого тиску устаткування, що використовується для отримання пари. Для паротеплового оброблення свердловину оснащують спеціальним устаткуванням.

Відомо теплові оброблення пластів вогневими нагрівачами (відкритим вогнем) на родовищах із парафінистими і високосмолистими нафтами на стадії зниження пластового тиску і різкого зменшення коефіцієнта проникності. Устаткування складається з компресора для подавання повітря, дозувального насоса ДН-150 для подавання дизпального, одноліфтового вибійного нагрівача (з камерою спалювання і форкамерою) і запалювального пристрою. Устаткування укомплектовано системою контрольно-вимірювальних приладів і автоматики. Керування роботою обладнання здійснюється з кабіни оператора. Кожне устаткування складається з двох блоків, змонтованих на жорсткій рамі-санках у фургоні. Після підготовки свердловини в неї опускають на НКТ нагрівач. Глибина опускання нагрівача вибирається з таким розрахунком, щоб тиск стовпа рідини над ним не перевищував максимального тиску компресора. Готову паливно-повітряну суміш, яка одержується в результаті роботи компресора і дозувального насоса, запомповують через НКТ у камеру спалювання. Для запалювання горючої суміші опускають спеціальний запальний пристрій на дроті з допомогою лебідки (апарата Яковлева). Свердловину обробляють, забезпечуючи коефіцієнт надлишку повітря 1,5-2, а на 1 кг палива подають 17-20 $м^3$ повітря. Тривалість оброблення становить15-30 год. у залеж-

ності від рівня рідини у свердловині. Як паливо використовують дизпальне, нафтовий або природний газ. Доцільно запомповувати газ у свердловину через сепаратор, що забезпечує осушення за парою до 93 % і більше.

Комплексні. Ці методи застосовують в складних гірських умовах, де одночасно проявляються декілька чинників, які погіршують фільтраційні властивості пласта. До них належать термокислотні обробки, термогазохімічні обробки, кислотний розрив пласта та ГРП із гранульованим магнієм.

Термохімічна обробка – процес обробки привибійної та віддаленої зон пласта соляною кислотою, нагрітою в результаті екзотермічних реакцій. Нагрівання КР відбувається під час екзотермічної реакції кислоти з магнієм в реакційному наконечнику на НКТ або в пласті з гранулами магнію, розміщеними в тріщинах. Під час цього СКР втрачає частину своєї хімічної активності. Термохімічні обробки призначені для обробки свердловин з яскраво вираженими ознаками відкладення парафіну і смол на фільтрі, і в привибійній частині пластів, для обробки доломіту, що погано розчиняється в СКР, а також для утворення глибоких каналів роз'їдання в карбонатних пластах. Така обробка очищає канали від закупорювальних відкладів і підвищує результативність взаємодії соляної кислоти з породою. Термохімічні обробки грунтуються на екзотермічних реакціях, які відбуваються при реагуванні соляної кислоти з деякими речовинами, наприклад алюмінієм, магнієм, гашеним вапном, карбідом кальцію, їдким натром, їдким калієм та іншими. Найбільша кількість тепла виділяється при взаємодії соляної кислоти з металевим алюмінієм. На 1 кг алюмінію виділяється 4670ккал тепла або на кожну грам-молекулу виділяється 126 ккал тепла. Однак після повної нейтралізації соляної кислоти утворений хлористий алюміній випадає в осад у вигляді обємної маси гідрату оксиду алюмінію. Тому використовувати алюміній для термохімічних обробок не рекомендується. При взаємодії металевого магнію та соляної кислоти виділяється 4520 ккал тепла на 1 кг магнію або на кожну грам-молекулу магнію виділяється 110,2 ккал тепла. Утворений при цьому хлористий магній повністю залишається в розчині. У час реакції гашеного вапна і карбіду кальцію виділяється відповідно 572 і 852 ккал/кг, а їдкого натру і їдкого калію відповідно 592 і 450 ккал на 1 кг твердої речовини. Всі перелічені вище реагенти значно поступаються алюмінію і магнію щодо виділення тепла при взаємодії з соляною кислотою. Тому їх майже не використовують у промисловій практиці при термохімічних й термокислотних обробках.

Однієї із найефективніших термохімічних дій можна досягнути при взаємодії нітрату карбаміду з нітратом натрію. Використання цих реагентів дає змогу підвищити температуру оброблюваної зони пласта на 250-270 С, якої цілком достатньо, щоб розплавити парафінисті та асфальтосмолисті відкладення, що знаходяться в ній. Слід зазначити також, що оскільки термохімічна реакція відбувається безпосередньо в привибійній зоні пласта, технологія запобігає корозії устаткування у свердловині. Внаслідок взаємодії нітриту натрію з нітратом карбаміду не тільки виділяється велика кількість тепла, що дає змогу прогріти значний обєм пласта і досягти розплавлення парафінистих і асфальтосмолистих відкладів, але й утворюється азотна кислота, яка взаємодіє з породами пласта і як кислота, і як окисник, збільшуючи властивості фільтрації обробленої зони. Для того, щоб дію кислоти на пласт зробити комплексною при збільшенні проникності привибійної зони пластів з теригенними колекторами (пісковики, алевроліти), технологічний процес термохімічної реакції взаємодії нітриту натрію з нітратом карбаміду доцільно доповнити обробкою привибійної зони пласта глинокислотою.

Термокислотна обробка – комбінований процес обробки пласта соляною кислотою, при якому спочатку проводиться термохімічна, а потім звичайна соляно-кислотна обробка. При термокислотній обробці внаслідок збільшення активності соляної кислоти шляхом підвищення її температури, відкриваються канали в породі, які забезпечують можливість просування холодної кислоти вглиб пласта. Для термокислотних обробок можна було б підігрівати кислоту на поверхні, однак втрати тепла при транспортуванні її до вибою і висока корозійна активність гарячої кислоти практично виключають цю можливість.

Гідровібратори використовують при гідромеханічному впливі на привибійну зону пласта, їх можна застосовувати і при солянокислотних обробках пласта. Процес нагнітання кислоти з одночасним впливом на пласт віброударними хвилями здійснюється за такою технологічною схемою: встановлюють у свердловині гідровібратор, промивають її; при відкритому затрубному просторі помпують у свердловину кислоту в об'ємі, рівному об'єму насосно-компресорних труб; закривають затрубний простір і нагнітають в пласт кислоту обємом протискувальної рідини. Коливання, зумовлені гідровібраторами, діючи на пласт і рідину, яка його насичує, поліпшують умови проникнення кислоти у пласт. Це сприяє ефективнішій обробці привибійної зони.

Кислотні гідророзриви пласта (КГРП) є різновидом кислотних обробок під високим тиском і відрізняються від них, насамперед, великими об'ємами та високими темпами закачування розчину кислоти. КГРП рекомендують для свердловин, де відсутній або недостатній гідродинамічний зв'язок з пластом. Комбінуючи методи гідродинамічного і хімічного впливу на пласт, можна одержати значні припливи із пласта. При КГРП тиск нагнітання може перевищувати міцнісні характеристики колони, тому їх проводять з пакером або з протитиском бурового розчину. Кислотний розрив пласта призначений для розкриття та розширення мікротріщин в породах. Його можна здійснювати, заповнивши утворені тріщини розклинювальним матеріалом або без цього заповнення.

КГРП без заповнення тріщин розклинювальним матеріалом застосовується частіше, бо його простіше здійснити. Внаслідок хімічного впливу на породи пласта, неоднорідності їх мінералогічного складу й тріщинуватості, розчинення породи відбувається по-різному. Тому після зниження надлишкового тиску тріщини змикаються не повністю, і в пластах утворюються високопроникні зони. Високі темпи закачування розчину дають змогу досягти ефекту гідравлічного розриву пласта, а великі об'єми закачуваного розчину – обробити віддалені зони пласта. В процесі КГРП можуть бути використані нафтокислотні емульсії та пінні системи, з допомогою яких кислота рухається пластом на значні відстані. Для ефективнішої обробки часто використовують водні розчини ПАР, змішані з кислотою або запомповувані порціями з соляно-кислотним розчином.

Термоакустичне діяння на привибійну зону полягає в одночасній дії на пласт потужних теплових і акустичних полів. У цьому випадку різко зростає радіус прогрітої зони (до 8 м), відбувається інтенсивне руйнування і винесення з пласта під час пуску свердловини в експлуатацію парафіну, бурового розчину і його фільтрату, гідратів газу і деяких солей. Термоакустичне діяння може здійснюватися у свердловинах глибиною до 2500 м, розташованих на відстані не менше 50 м від фронту нагнітання, щоб уникнути прориву води в результаті оброблення. Для оброблень використовується комплекс апаратури, що складається з наземного ультразвукового генератора з блоком автоматичного підстроювання частоти (від 15,5 до 23 кГц), кабелю КПБК і секційного термоакустичного випромінювача з пермендюра (сплав заліза і кобальту з добавкою ванадію). Випромінювач опускають на колоні НКТ або на кабелі-тросі.

Постановка задачі. Розглянемо більш детально декілька нафтових родовищ, які знаходяться поруч в одному районі, зокрема Бориславське, Верхньомасловецьке, Старосамбірське, Заводівське, Орів-Уличнянське, Коханівське та Мельничинське родовища.

Основний матеріал. Усі вищеназвані родовища знаходяться на заході Львівської області в районі м. Борислав. Саме тут, на Передкарпатті, почався промисловий видобуток вуглеводнів в Україні ще у 18ст. у 1909р. в Бориславі річний видобуток становив 1,92млн.т. Тут існує давня традиція використання методів інтенсифікації припливу вуглеводнів до свердловини. Дані родовища розробляються НГВУ «Бориславнафтогаз». Станом на 01.01.2012 р. в діючому фонді налічувалося 562 видобувні свердловини, в т.ч. 11 фонтанних, 161желонкова та 16 нагнітальних. В бездії перебувало 187 видобувних та 17 нагнітальних свердловин. Більшість родовищ знаходяться на пізній стадії розробки, коли пластова енергія вже виснажена. Це призводить до роботи свердловинних штангових глибинних насосів, і, особливо, до застосування методів інтенсифікації. Річний видобуток нафти з родовищ у 2011р – 101,25тис.т., води – 182,992тис.т., газу – 37,641млн. м^3. Завдяки застосуванню методів інтенсифікації до 16,3 тис.т. зріс річний видобуток нафти із покладів Верхньомасловецького родовища.

Для підтримання стабільної роботи видобувних свердловин проводилися такі методи інтенсифікації. На родовищах Бориславське, Старосамбірське, Заводівське, Орів-Уличнянське, Мельничанське застосовували обробку привибійної зони пласта (ПЗП) із використанням підкислених розчинів поверхнево активних речовин (ПАР), які забезпечують очищення від асфальтеносмолистопарафінових відкладень (АСПВ) як ПЗП, так і обладнання; обробку із застосуванням розчинника «Пропаніл» та ПАР, які в суміші з конденсатом і 5% жириноксом забезпечують розчинність різних АСПВ в межах від 70% до 100%; обробку інгібітором «Рена-2210». Технологія обробки ПЗП та глибинного обладнання інгібітором «Рена-2210» забезпечує не тільки руйнування АСПВ у ПЗП, але і попередження подальшому їх відкладенню на поверхні порових каналів, НКТ та підземного обладнання в подальшій експлуатації свердловин. Також були проведені термохімічні впливи на ПЗП методами, які дозволяють провести термохімічну обробку всього неоднорідного за проникністю розрізу свердловини, покращити ефективність термохімічної дії, зменшити до мінімуму негативний вплив тимчасово блокуючої рідини. Зокрема така обробка за 2011р проведена у свердловині №26 Коханівського родовища. Внаслідок цієї обробки дебіт зріс на 10,17 т/доб, і за 296 діб загальний ефект склав 1037т.

Для покращення приймальності нагнітальних свердловин проводились соляно- та глинокислотні обробки. На родовищах Бориславське, Орів-Уличнянське, Старосамбірське проведено соляно- кислотні оброблення нагнітальних свердловин. Так, на Бориславському родовищі на свердловині №2001 після СКО приймальність зросла з 65м^3/доб до 480 м^3/доб, а загальний ефект склав 256297м^3; на свердловині №3 Старосамбірського родовища приймальність зросла з 20м^3/доб до 86 м^3/доб, а загальний ефект склав 15684м^3. З метою інтенсифікації видобутку нафти проведено три потужні гідророзриви пласта (ПГРП) та два кислотні гідророзриви пласта (КГРП) у свердловинах Старосамбірського та Бориславського родовищ. Проведені ПГРП із використанням поперечно зшитого водного гелю фірми «Clearwater.Inc» на Старосамбірському родовищі в 2008р та ПГРП із використанням гелевої рідини «Галгель» в 2010 р. на родовищі Старосамбірське, а в 2011 р. і на Бориславському родовищі. Внаслідок проведення ПГРП у свердловині №73 Старосамбірського родовища дебіт зріс в середньому на 3,18т/доб, тривалість ефекту становить 493доби і загальний ефект склав 1481 т/доб по нафті і 168тис.м^3 по газу.

На Бориславському родовищі були проведені кислотні розриви пласта, які сприяли збі-

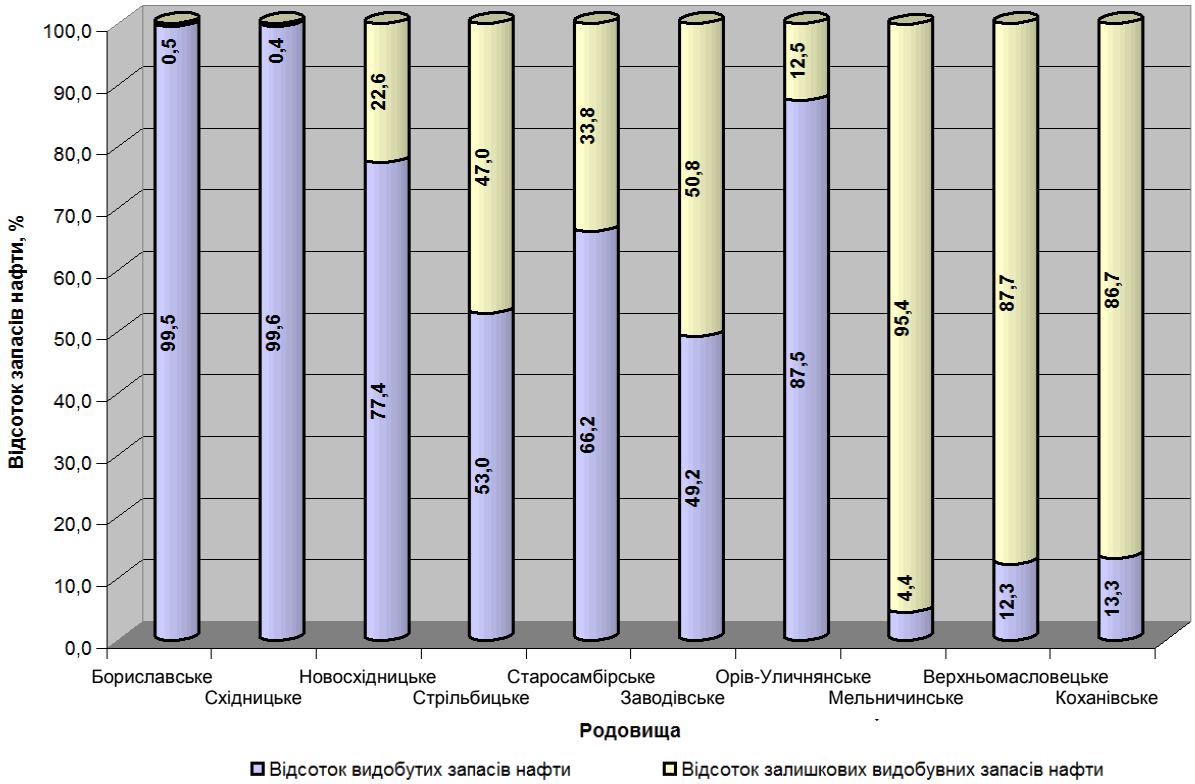


Рисунок 1 – Вилучення видобувних запасів нафти із родовищ НГВУ «Бориславнафтогаз» станом на 01.01.2012 р.

льшенню продуктивності свердловин шляхом створення у пластах вузьких тріщин, стінки яких розчиняються кислотним розчином. Технологія призначена для дії на піщані та карбонатні колектори. Так, наприклад, на свердловині №1600 після проведення КГРП дебіт зріс з 1,19 т/доб до 1,62 т/доб. Загальний ефект з даної обробки за 2011р склав 922 т за нафтою і 1407тис.м^3 за газом. Також було проведено пару обробок привибійної зони пласта водно-спиртовим розчином савенолу на Бориславському родовищі протягом 2011р, які сприяють збільшенню коефіцієнта витіснення рідини із пласта і ефективно діють на різнопроникні пропластки неоднорідного за проникністю розрізу. Дебіт до обробки становив 0,29т/доб , а вже після - 0,6т/доб. Таким чином загальний ефект від даної обробки склав: за нафтою 511,66т і за газом 234,44тис.м^3. Розробка покладів Бориславського і Східницького родовищ знаходиться на завершальній стадії – відбір від затверджених видобувних запасів понад 99% (рис. 1). Значна кількість залишкових видобувних запасів нафти зосереджена у відкладах Старосамбірського та Заводівського родовищ. Невеликий відсоток відбору видобувних запасів нафти – на Мельничинському та Коханівському родовищах.

Висновки

1. На Бориславському родовищі станом на 01.01.2012р завдяки різним методам інтенсифікації відібрано 99% нафти від видобувних запасів.

2. Поточний коефіцієнт нафтовилучення становить 0,2891 при кінцевому 0,2908.

3. Фактичні видобутки нафти з відкладів Глибинної складки та з відкладів Насуву вищі від затверджених видобувних запасів.

4. Методи інтенсифікації припливу вуглеводнів є єфективним інструментом збільшення коефіцієнта нафтогазоконденсатовилучення і збільшення сумарної кількості видобутих вуглеводнів.

Література

1 Яремійчук Р.С. Освоєння та дослідження свердловин / Р.С. Яремійчук, В.Р. Возний. – Львів: вид. Оріяна-Нова, 1994. – 440 с.

2 Качмар Ю.Д. Інтенсифікація припливу вуглеводнів у свердловину / Ю.Д.Качмар, В.М.Світлицький, Б.Б.Синюк, Р.С.Яремійчук. – Львів: вид. Центр Європи, 2004. – 351с.

3 Бойко В.С. Підземний ремонт свердловин / В.С.Бойко. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2009. – 587 с.

Стаття надійшла до редакційної колегії 23.01.13
Рекомендована до друку професором ***Бойко В.С.*** *(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ) професором* ***Світлицьким В.М.*** *(ПАТ «Укргазвидобування», м. Київ)*

УДК 622.276

АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПОДГОТОВКИ НЕФТЕЙ АЗЕРБАЙДЖАНА С ПРИМЕНЕНИЕМ ДЕЭМУЛЬГАТОРОВ

И.Н. Келова

НИПИ «Нефтегаз» ГНКАР, 1077, г. Баку, Пираллахинский район, остров Пираллахи, ул. Азизбекова 66, кв.2, д.т. 0124572686, м.т.0505905035; e-mail: 4572686@mail.ru

Проведено аналіз якості підготовки нафт Азербайджану із застосуванням реагентів-деемульгатора. Наведено нові методи удосконалення процесу промислової підготовки вуглеводнів.

Дослідженнями останніх років встановлено, що ефективність застосування того чи іншого виду реагенту багато в чому визначає водовміщення емульсії, а стійкість емульсії залежить від якісного складу нафт. Оскільки технологічний регламент в частині, що стосується дозування водонефтяной системи, часто не витримується, то в залежності від якісного складу нафти та кількісного вмісту компонентів вуглеводневої системи і води витрата реагенту змінюється. Тому виникла необхідність в розроблянні нових технологій введення реагентів.

Показано можливість стимулювання властивостей реагентів фізичними полями, що дасть змогу залучати до процесу деемульсації малоефективні і водночас час дешеві і екологічно прийнятні реагенти, компенсуючи тим самим дефіцит високовартісних реагентів-деемульгаторів.

Експериментально доведено існування принципової можливості значного підвищення ефективності процесу деемульсації водонафтових систем, тобто зменшення витрати деемульгатора шляхом цілеспрямованого підвищення водонасиченому підготовленої нафти до граничного значення.

Ключові слова: нафта, зневоднення, деемульгатора, ультразвук, водо насиченість.

Проведен анализ качества подготовки нефтей Азербайджана с применением реагентов-деэмульгаторов. Приведены новые методы усовершенствования процесса промысловой подготовки углеводородов.

Исследованиями последних лет установлено, что эффективность применения того или иного вида реїгента во многом определяется водосодержанием эмульсии, а устойчивость эмульсии зависит от качественного состава нефтей. Так как технологический регламент в части, касающейся дозировки водонефтяной системы, часто не выдерживается, то в зависимости от качественного состава нефти и количественного содержания компонентов углеводородной системы и воды расход реагента изменяется. Поэтому возникла необходимость в разработке новых технологий введения реагентов.

Показана возможность стимулирования свойств реагентов физическими полями, что позволит привлекать к процессу деэмульсации малоэффективные и в то же время дешёвые и экологически приемлемые реагенты, компенсируя тем самым дефицит дорогостоящих реагентов-деэмульгаторов.

Экспериментально доказано существование принципиальной возможности значительного повышения эффективности процесса деэмульсации водонефтяных систем, т.е. уменьшения расхода деэмульгатора путем целенаправленного повышения водонасыщенности подготовленной нефти до предельного значения.

Ключевые слова: нефть, обезвоживание, деэмульгатор, ультразвук, водонасыщенность

In article the analysis of a condition of preparation oils Azerbaijan with application of reagents-demulsifies, and also new methods of improvement in the course of trade preparation of hydrocarbons is carried out.

By researches of last years it has been revealed, that efficiency of application of this or that kind of a reagent is in many respects defined by the water maintenance emulsion, and stability emulsion, besides other, depends on qualitative structure petroleum. So the production schedules regarding a concerning dosage of water oil system a reagent, often are not maintained and depending on qualitative structure of oil and the quantitative maintenance of components of hydrocarbon system and water the reagent expense changes. In this connection has arisen necessity for working out of new technologies on the basis of application of reagents and influence of physical fields

In article possibility of stimulation of properties of reagents is shown by physical fields. Possibility of stimulation of properties of reagents with physical fields has allowed involving also in process demulsifications ineffective and at the same time cheap and ecologically comprehensible reagents and by that to compensate deficiency in expensive reagents - emulsion breakers.

By experimental methods it is shown, that there is a basic possibility of substantial increase of efficiency of process demulsifications water oil systems, i.e. expense reduction деэмульгатора by purposeful increase of a water saturation of the prepared oil to limiting value.

Keywords: oil, dehydration, demulsifies, ultrasound, water saturation

Развитие топливно-энергетичекого комплекса Азербайджана наряду с освоением новых перспективных месторождений нефти и газа предусматривает интенсификацию нефтегазодобычи с уже разрабатываемых месторождений.

В настоящее время в разработку введено большое количество месторождений нефти повышенной вязкости. Эти нефти в большинстве случаев обладают аномальными свойствами и являются неньютоновскими, что вызывает дополнительные затруднения при разработке нефтяных месторождений (образуются сложные гетерогенные системы-эмульсии [1]) и транспортировке добываемого продукта.

Наличие воды в составе добываемой нефти приводит к удорожанию ее транспортировки, присутствие минеральных солей в виде кри-

сталлов и водного раствора вызывает усиленную коррозию металла оборудования и трубопроводов, а наличие в нефти механических примесей - абразивный износ нефтеперекачивающего оборудования и трубопроводов, ухудшение качества получаемых нефтепродуктов и нарушение технологического режима переработки нефти из-за недостаточной герметизации систем сбора, транспорта и хранения лёгкие углеводороды (от этана до пентана) теряются в результате испарения).

Перечисленные причины обуславливают необходимость подготовки, которая предусматривает обработку нефти с целью удаления загрязняющих компонентов - воды, минеральных солей, механических примесей, лёгких углеводородных газов, усложняющих её транспортировку и последующую переработку [2].

Современные процессы нефтепереработки требуют глубокого обезвоживания и обессоливания сдаваемой на переработку нефти. Как известно, деэмульсация тяжелых нефтей усложнена их высокой вязкостью, малой разностью плотностей пластовой воды и нефти, наличием большого количества асфальтеносмолистых веществ и механических примесей. Подготовка нефти ведётся на комплексных установках обезвоживания, обессоливания и стабилизации нефти, объединённых в единую технологическую схему сбора и подготовки нефти и попутного газа на нефтяных промыслах республики. Качество подготовки нефти регламентируется ГОСТом.

От качества подготовленной нефти зависят эффективность и надежность работы магистрального трубопроводного транспорта, стоимость товарной нефти и качество полученных из нее продуктов.

Товарная нефть, сдаваемая промыслами по первой группе, наивысшую цену. На термохимических и электрообессоливающих промысловых установках содержание солей и воды в нефти стремятся довести до нормы, обеспечивающей получение нефти по I группе. Для решения этих проблем применяются деэмульгаторы, которые кроме своих основных свойств обладают специализированным действием, обладающим способностью разрушать нефтяные эмульсии, к которым в промышленном масштабе предъявляются определенные требования [3].

Деэмульгатор должен обладать значительной активностью, чтобы при небольшом расходе обеспечить разложение эмульсированной нефти. Помимо активности очень важно, чтобы добавление химического вещества при деэмульсации не ухудшало качество обезвоженной нефти и получаемых из нее нефтепродуктов. Кроме того, деэмульгатор должен обладать способностью хорошо смешиваться с той системой, в которую он вводится, что необходимо для обеспечения тесного контакта его с эмульгатором.

При обработке нефтяной эмульсии деэмульгатор, попадая в нефтяную фазу эмульсии, взаимодействует с защитными слоями на каплях эмульгированной воды, поэтому вероятно существование связи между структурой и составом стабилизатора на поверхности данных капель со структурой и составом деэмульгаторов, наиболее эффективно обрабатывающих эмульсию нефти. Для выявления взаимосвязи свойств деэмульгаторов с углеводородным составом нефтей, взятые для исследования эмульсии в зависимости от соотношения суммарного содержания асфальтенов и смол к содержанию парафинов в нефти разделены на три группы:

- смешанного типа (указанное соотношение 0,75 - 1,39);
- смолистого типа (2,16 - 3,28);
- высокосмолистые (более 4).

Такая в определенной мере произвольная классификация позволяет выявить некоторые тенденции взаимосвязи свойств деэмульгаторов с их эффективностью при обработке эмульсий нефтей различного углеводородного состава.

Полученные закономерности позволяют выявить наиболее эффективную группу веществ, относящихся к данному классу соединений, и на основе их строения подобрать необходимое сырье и разработать технологию для производства этих веществ. Этот подход обеспечивает возможность получения деэмульгаторов с высокой деэмульгирующей способностью применительно к технологическим процессам подготовки нефтей с разнообразными физико-химическими свойствами.

Большое значение в процессе промысловой подготовки нефти имеет не только тип деэмульгатора, но и технология обработки им эмульсии. Химическое деэмульгирование нефтяных эмульсий включает две стадии: доведение деэмульгатора, введенного в нефтяную эмульсию, до поверхности капель эмульгированной воды и проникновение его в защитные слои капель с последующим их разрушением. Первая из них наиболее важна как лимитирующая стадия процесса разрушения защитных оболочек на поверхности капель эмульгированной воды и зависит от способа введения деэмульгатора, его физико-химических свойств, углеводородного состава нефтяной фазы эмульсии и турбулентности обрабатываемого потока. На эффективность проведения первой стадии процесса значительно влияет растворимость деэмульгаторов в нефтяной фазе эмульсии. Управление этой стадией осуществляется путем изменения гидродинамических параметров эмульсионного потока и выбором способа введения деэмульгатора.

Вторая стадия технологии зависит, в основном, от эффективности процесса выхода деэмульгатора на межфазную поверхность капель эмульгированной воды. Она может быть интенсифицирована путем внесения дефекта (концентратора напряжения) механическим или физическим способом в структуру защитных оболочек в присутствии деэмульгатора.

Анализируя состояние подготовки нефтей Азербайджана с применением реагентов-деэмульгаторов, а также новые методы усовершенствования в процессе промысловой подго-

товки углеводородов, можно отметить следующее.

Как известно, предприятиями химической промышленности бывшего Союза, а также Германии, США, Японии, Англии разработаны реагенты – деэмульгаторы. В Азербайджане в качестве деэмульгатора использовался реагент «контакт Петрова», именуемый промысловиками как «осветленный контакт». Затем в производство поступил нейтрализованный черный контакт (НЧК) и различные его модификации. Начиная с 1967 года в республику стали использовать деэмульгаторы зарубежного образца типа Дисольван-4411. Активные работы по созданию эффективных деэмульгаторов велись в России (Башкирия, Татария). Так, еще в конце 80-х годов в республику начал поступать из Татарии реагент Реапон–4. Однако на сегодняшний день среди зарубежных реагентов общепризнанным остается Дисольван. Среди отечественных разработок последних лет весьма конкурентоспособным являются реагенты ALKAN DE-202 и ALKAN DE-318.

На эмульсионных нефтях НГДУ ПО "Азнефть" были проведены исследования эмульгирующих свойств отечественных и зарубежных деэмульгаторов: Проксанол 186; 305; Проксамин 385; Оксифос, Дипроксамин 157, НЧК, Сульфанол, Проксамин марки 435, 436, 437, 438, 440, 441, 442, 443 и 444 фирмы "XEXST" (ФРГ), Дисольван 4411 фирмы "HYBBЕЛКС" (Япония), марки GNB 005, 050, 210, 217, 302, 303, 304, 131, 140, 221, 301, 401, 500 фирмы "БАSF" (ФРГ), Сепарол 25, 3337, 3341. В исследованиях использовались нефти, отличающиеся по стойкости эмульсии, содержанию воды и физико-химическим свойствам. Как известно, содержание механических примесей и парафино-смолистых веществ в нефти отрицательно влияет на деэмульгирующую способность применяемых деэмульгаторов, и затрудняет их выбор.

Исследования проводились в диапазоне изменения удельного расхода реагента - в пределах от 50 до 300 г/т нефти, при температурах от 313 до 348 К с различной обводненностью нефти. Обрабатываемая нефть во всех опытах осуществлялась четырехчасовым отстоем. Остаточное содержание воды в товарной нефти определялось на аппарате Дина – Старка.

Результаты исследований деэмульгирующих свойств химических реагентов на нефтяных эмульсиях НГДУ ПО "Азнефть" приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты обезвоживания нефтей Азербайджана деэмульгаторами

НГДУ	Исходное содержание воды в нефти, %	Наименование химических реагентов	Расход реагента, г/т	Температура нагрева,К	Остаточное содержание воды в нефти, %
Им. А.Д.Амирова	18,4	Дисольван 4490	80	342	1,2
			100		0,8
		Прогалит 444	80		3,8
			100		6,0
		Сепарол 25	80		6,4
			100		5,6
		Дисольван 4411	80		1,4
			100		0,5
	3,0	Дисольван 4411	100		2,0
			150		1,2
	5,6	Дисольван 4490	50		0,8
			80		0,8
			100		0,4
Биби-Эйбат нефть	12,7	Дисольван 4411	50	333	5,3
			100		2,1
			150		0,9
		Проксамин 385	50		3,9
			100		1,8
			150		0,9
		Проксанол 305	50		7,9
			100		3,1
			150		2,1
	18,4	Прогалит 444	50		11,2
			100		9,1
			150		6,3

Продолжение таблицы 1

НГДУ	Исходное содержание воды в нефти, %	Наименование химических реагентов	Расход реагента, г/т	Температура нагрева,К	Остаточное содержание воды в нефти, %
Биби-Эйбат нефть	18,4	Дисольван 4411	50	333	11,2
			100		9,1
			200		6,3
		Проксамин 385	50	343	5,5
			100		2,7
			200		1,7
		Проксанол 305	50		6,0
			100		3,3
		Сепарол-3337	50	333	28
			100		7,9
			150		0,8
Мурадханлы-нефть	40,0	Дисольван 4490	100	333	38,7
			200		36,5
			300		30,2
	68,0	Сепарол-3341	100		1,5
			150		1,0
			200		0,9
		Сепарол 25	100		39,2
			200		38,9
			300		38,6
		Прогалит 444	100		39,1
			200		37,8
			300		36,9
		Дисольван 4411	100	313	39,2
			200		30,8
			300		30,2
Сальян-нефть	26,0	Дисольван 4411	60	348	11,4
			100		9,6
			150		3,7
Сальян -нефть	26,0	Проксамин 385	60	348	9,9
			100		5,2
			150		2,8
		Прогалит 444	60		17,3
			100		14,7
			150		10,3
Ширван-нефть	28,7	Дисольван 4411	50	333	2,5
			80		2,0
			100		1,8
		Проксанол 305	50		3,1
			80		3,1
			100		2,1
Бинагади-нефть	10,8	Дисольван 4490	30		0,7
			80		0,9
			100		0,6
		Прогалит 444	30		1,6
			80		1,6
			100		1,6

Продолжение таблицы 1

НГДУ	Исходное содержание воды в нефти, %	Наименование химических реагентов	Расход реагента, г/т	Температура нагрева, К	Остаточное содержание воды в нефти, %
Бинагади-нефть	10,8	Сепарол 25	30		1,6
			80		1,6
			100		1,4
		Дисольван- 4411	30		1,1
			80		1,2
			100		0,9
			120		0,6

Как видно из таблицы 1, большинство реагентов не проявило достаточной экономической эффективности: при их применении требовались дополнительные расходы реагентов, что является экономически нецелесообразным.

Исследованиями последних лет было выявлено, что эффективность применения того или иного вида реагента во многом определяется водосодержанием эмульсии, а устойчивость эмульсии, помимо прочего, зависит от качественного состава нефтей. Ввиду этого технологический регламент в части, касающейся дозировки водонефтяной системы реагентом, часто не выдерживается и в зависимости от качественного состава нефти и количественного содержания компонентов углеводородной системы и воды расход реагента изменяется. В связи с этим возникла необходимость в разработке новых технологий на основе применения реагентов и воздействием физических полей [4,5,6].

Нами было исследовано влияние термоультразвуковой обработки на процесс химической деэмульсации. Инициирующий эффект от ультразвукого воздействия связан с повышением площади контактирующихся фаз. С увеличением поверхности раздела в условиях генерирования ультразвуковых волн улучшаются условия доставки реагента до границы раздела фаз, что способствует стимулированию процесса деэмульсации. Работы в этом направлении велись с учетом обеспечения отрасли необходимыми объемами реагентов местного производства, отвечающих экологическим требованиям и задачам ресурсосбережения. Здесь следует отметить, что технологии по комбинированному применению химических реагентов с физическими полями наряду с инициированием технологических операций позволило, в определенной степени, покрывать дефицит в дорогостоящих реагентах. Возможность стимулирования свойств реагентов физическими полями позволило также привлекать к процессу деэмульсации малоэффективные и в то же время дешёвые и экологически приемлемые реагенты.

Для технико-экономической оценки целесообразности применения комбинированной деэмульсации с реагентом «Сепарол-3337» и ультразвуковым полем был рассмотрен параметр удельного расхода реагента φ, характеризующий расход деэмульгатора на единицу эффективности его применения:

$$\varphi = \frac{C}{\Delta Э} \ .$$

В зависимости от параметра удельной эффективности процесса деэмульсации от расхода реагента на рисунке 1 представлены характерные регулировочные кривые для $\varphi = \frac{C}{\Delta Э}$ реагента «Сепарол-3337». Как видим, наименьший расход реагента, приходящийся на единицу эффективности, после ультразвукового воздействия снижается. Такое комбинированное воздействие позволяет инициировать процесс деэмульсации реагентами, тем самым компенсировать дефицит в дорогостоящих реагентах-деэмульгаторах ультразвуком.

В Азербайджане большое количество месторождений находятся на поздней стадии разработки. Длительная эксплуатация нефтяных месторождений и заводнение нефтеносных пластов приводят к образованию стойких водонефтяных эмульсий. На конечных стадиях разработки содержание воды в нефти может достигать 90% и более, при этом сырье, поступающее на установки подготовки нефти, характеризуется не только разнообразием физико-химических свойств, но и изменением его состава во времени [7].

Внедрение новых технологий по разрушению стойких водонефтяных эмульсий требует разработки научно-обоснованного подхода, базирующегося на глубоком знании особенностей формирования структуры межфазного слоя в зависимости от содержания и состава водной и нефтяной фаз. Однако на данное время структурно-механические свойства эмульсий в зависимости от строения нефтяных стабилизаторов, характеризующихся сложностью состава, недостаточно глубоко исследованы. Углубленное изучение группового состава межфазных слоев эмульсий, в которых концентрируются эмульгаторы, имеет научно-практическое значение для разработки нефтяных месторождений.

В качестве объекта исследования выбрана высоковязкая, реологически сложная нефть находящегося на поздней стадии разработки Мурадханлинского месторождения. На секцион-

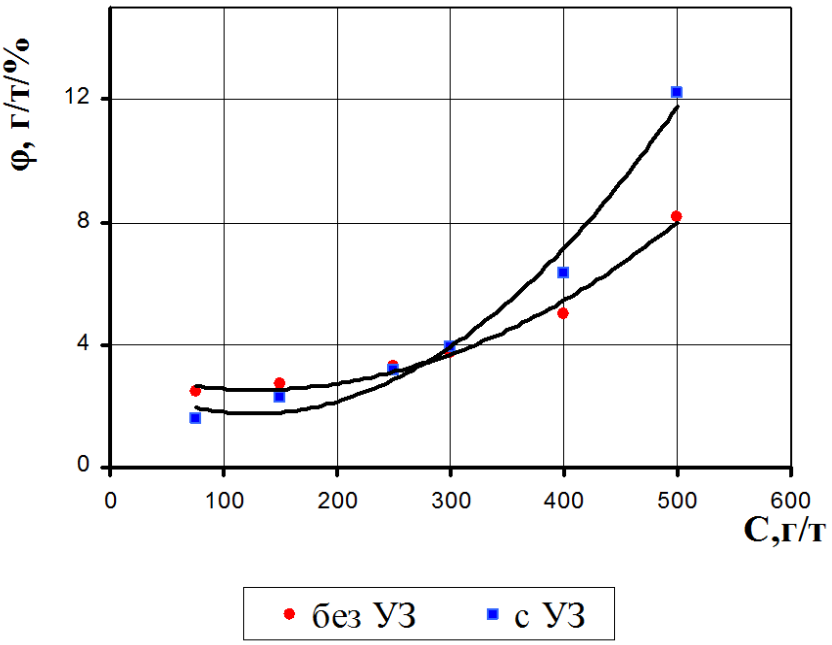


Рисунок 1 – Зависимость параметра удельной эффективности процесса деэмульсации от расхода реагента

Таблица 2 – Зависимость остаточного содержания воды от водонасыщенности нефти при различных расходах реагента

Расхода реагента Дисольван-444, г/т	Водонасыщенность, %						
	22	30	40	50	60	70	80
	остаточное содержание воды, %						
200	18	16	15.5	14	10	8	6
300	10	7	5.5	5	2.7	2.4	1.2
400	9	6.5	5.2	4.8	2	1.6	0.4
500	8	6	5	4.5	1.5	1.2	0.1
600	7	5.5	4	4	1.2	0.6	0.1

ной вибромешалке при одинаковых амплитудно-частотных характеристиках мешалки были приготовлены эмульсионные пробы различного водосодержания. Максимальная доза насыщения водонефтяной эмульсии составила 80%, минимальная водонасыщенность - 22%. Пробы дозировались различными расходами реагента - от 200 до 600 г/т при температуре реагента 60 ^{0}C

Как видно из таблицы 2, деэмульгация нефти при начальном содержании воды 22%, не дала ожидаемого результата, т.е. при использование максимального расхода реагента (600 г/т) остаточное содержание воды составило 7 %. Аналогичные результаты были получены при 30, 40, 50% содержании води (остаточное содержание воды составило выше 4%, что не отвечает основным требованиям к качественной подготовке нефти) при этом требовались дополнительные расходы реагентов, что является экономически нецелесообразным.

И только при повышенной водонасыщенности - 70% и выше, а также при расходе реагента 600 г/т, остаточное содержание воды не превышало одного процента. Это подтвердило достигаемость высокой степени обезвоживания нефти и свидетельствует об ускорении процесса выделения воды из эмульсии и уменьшении расходного содержания реагента-деэмульгатора при повышенной водонасыщенности .

Таким образом, экспериментальными методами доказано существование принципиальной возможности значительного повышения эффективности процесса деэмульсации водонефтяных систем (т.е. уменьшения расхода деэмульгатора), которая достигается путем целенаправленного повышения водонасыщенности подготовленной нефти до предельного значения.

Литература

1 Гумбатов Г.Г. Изучение процесса сбора, транспорта и подготовки нефтей в условиях морских месторождений Азербайджана / Г.Г. Гумбатов. – Баку: Элм Академия наук Азербайджана, 1996. – 240 с.

2 Лутошкин Г.С. Сбор подготовка нефти, газа и воды / Г.С. Лутошкин. – М.: Недра, 1979. – 210 с.

3 Абрамзон А.А. Поверхностно-активные вещества. Свойства и применение / А.А. Абрамзон. – М.: Химия,1975. – 245 с.

4 Повышение эффективности применения реагентов на основе применения физических полей / О.Т.Багиров, И.Н.Келова, С.Г.Салимова // Азербайджанское народное хозяйство. – 2002. – № 1. – С.20-23.

5 Стимулирование свойств реагентов физическими полями в процессе деэмульсации нефтей / [Багиров М.К., Багиров.О.Т., Рамазанова Ф.А., Келова И.Н.] // Процессы нефтехимии и нефтепереработки. – 2002. – № 1(8). – С.19-22.

6 Келова И.Н. Использование ультразвука при деэмульсации нефтей // Азербайджанское нефтяное хозяйство. – 1999. – №12. – С. 30-33.

7 Технология обезвоживания реологически сложных нефтей при подготовке их к транспорту / Г.Г.Исмайылов, И.Н.Келова, Г.П.Алиев, Х.И.Гасанов // Трубопроводный транспорт: Теория и практика. – 2011. – № 6. – С. 30-33.

Стаття надійшла до редакційної колегії
23.01.13
Рекомендована до друку
професором ***Мойсишиним В.М.***
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)
професором ***Гасановим Е.***
(НИПИ «Нефтегаз» ГНКАР,
Азербайджан, г. Баку)

УДК 551:243.4:553.98(477.75)

ПРО РОЛЬ РОЗЛОМІВ ПІВНІЧНО-ЗАХІДНОГО ПРОСТЯГАННЯ У ФОРМУВАННІ ПАСТОК ВУГЛЕВОДНІВ У МЕЖАХ ПРИКЕРЧЕНСЬКОГО ШЕЛЬФУ

[1]М.І. Євдощук, [2]А.М. Коваль, [3]Т.М. Галко, [2]О.В. Волкова

[1] Інститут геологічних наук НАН України;01054, м. Київ, Україна, вул. О.Гончара 55-б
тел. 050 331 57 33, e-mail: myevdoshchuk@rambler.ru

[2] ДП «Науканафтогаз» НАК «Нафтогаз України», 08132, Київська обл., м. Вишневе, вул. Київська, 8,
тел. 044 391 74 19, e-mail: koval@naukanaftogaz.kiev.ua

[3] Український науково-дослідний інститут природних газів (УкрНДІГаз),
61010, м. Харків, Червоношкільна набережна,20, тел. 050 632 39 36,
e-mail: gazrozrobka@gmail.com

Розглянуто проблемні питання розломної тектоніки і формування пасток вуглеводнів у межах Прикерченського шельфу Чорного моря. Встановлено, що в межах відповідної території виділяються тектонічні порушення північно-східного, субширотного, субмеридіанального та північно-західного простягання, з яких структуро-контролюючими вважалися найбільш масштабно проявлені насувні дислокації північно-східного простягання. Доведено, що тектонічні порушення іншої діагональної системи, переважно скиди та правосторонні зсуви, тут також мають широке розповсюдження і структуро-контролююче значення. Вони фрагментарно виявляються в нафтогазоперспективних відкладах палеоген-неогенового віку за даними 3-D сейсморозвідувальних робіт та пов'язуються із зонами регіональних розломів, які досить чітко проявляються в мережі регіональних лінеаментів та простежуються в гравітаційному полі і характеризуються зонами його різких градієнтів. Пропонується приділяти увагу вивченню тектонічних порушень, поперечних по відношенню до осей складок, зокрема правосторонніх зсувів, скидів та підкидів північно-західного простягання. Імовірно, вони можуть бути тектонічним екраном для ряду пасток.

Ключові слова: розломна тектоніка, пастка, шельф, регіональний розлом.

Рассмотрены проблемные вопросы разломной тектоники и формирования ловушек углеводородов в пределах Прикерченского шельфа Черного моря. Установлено, что на данной территории распространены тектонические нарушения северо-восточного, субширотного, субмеридианального и северо-западного простираний, из которых структуро-контролирующими считались наиболее масштабно проявленные надвиги северо-восточного простирания. Утверждается, что тектонические нарушения другой диагональной системы, преимущественно сбросыи правосторонние сдвиги, тут также имеют широкое распространение и структуро-контролирующее значение. Они фрагментарно выявлены в нефтегазоперспективных отложениях палеоген-неогенового возраста по данным 3-D сейсморазведки и связываются с зонами региональных разломов, которые четко проявлены в сети региональных линеаментов и прослеживаются в гравитационном поле по характерным зонах его градыентов. Предложено внимание уделять изучению тектонических нарушений, поперечных по отношению к осям складок, в частности, правосторонних сдвигов, сбросов и взбросов северо-западного простирания. Вероятно, они могут служить тектоническим экраном для ряда ловушек.

Ключевые слова: разломная тектоника, ловушка, шельф, региональный разлом.

Problem points of the fault tectonics and formation of hydrocarbon traps within the Peri-Kerch Shelf of Black Sea are featured. Tectonic faults of the northeastern, latitudinal, sub-meridional and northwestern strike are mapped within the area studied. Thrust dislocations of the northeastern strike are most powerful from those ones and control the structure of terrain. It is proved that oblique-trending tectonic faults, mainly normal faults and dextral strike-slip ones, are also common and influence the overall structure. These ones are locally recognized by 3D seismic data and related to the network of regional lineaments tracing by sharp gradient changes in the observed gravity field. It is proposed to pay more attention to studying of tectonic faults, transversal to fold axes and dextral strike-slips, normal faults and thrusts of northwest strike in particular. Quite likely these ones can tectonically screen the traps.

Keywords: fault tectonics, traps, shelf, regional lineaments.

Постановка проблеми. Протягом останнього десятиріччя Прикерченський шельф Чорного моря привертає все більше уваги як один з найперспективніших районів пошуку покладів вуглеводнів в межах української частини акваторії Чорного моря. Прогнози щодо нафтогазоносності даного району підтвердилися, а його ресурсна база помітно зросла з відкриттям в 2006 р. в межах Прикерченського шельфу нафтового родовища Субботіна (рис. 1). Однак залишається багато проблемних питань стосовно глибинної будови регіону, генезису і морфології нафтогазоперспективних структур типу пасток, кінематики тектонічних порушень та ін.

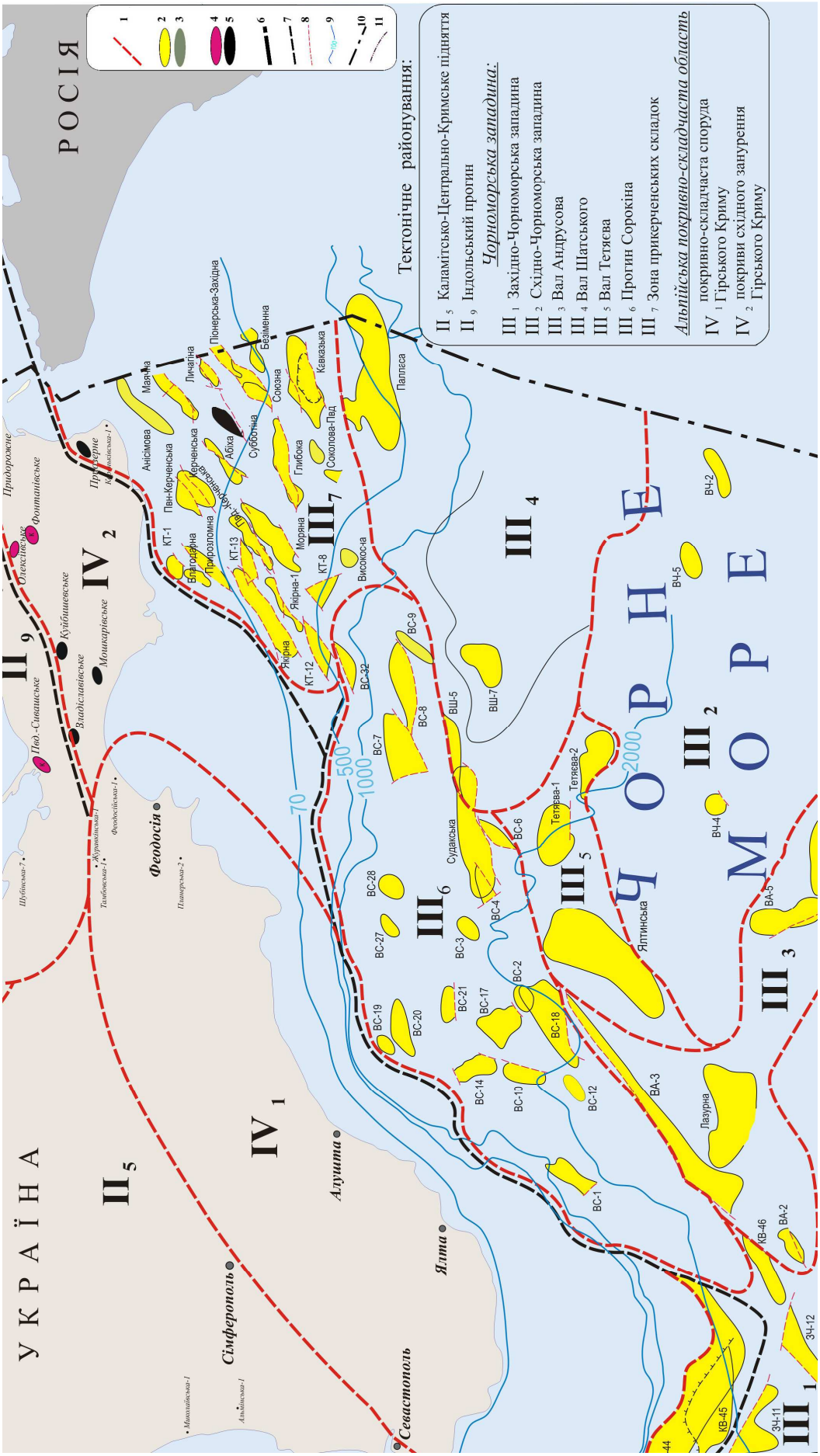


Рисунок 1 – Фрагмент схеми структурно-тектонічного районування українського сектору Чорноморсько-Азовського регіону за даними ДП «Науканафтогаз» (Попадюк І.В. та ін., 2006 р.)

На сучасному етапі геологічної вивченості території Прикерченського шельфу Чорного моря трактування його тектонічної позиції та внутрішньої будови також є неоднозначним [1, 2]. Відповідна структурно-тектонічна одиниця трактується як прогин, що має різні назви: «міжперикліналь-ний», «перикліналь-ний», «поперечний», «Південнокерченський». Ця територія має ще багато назв, які їй повністю або частково відповідають: «Пантикапейське підняття», «Прикерченський мегаблок похованого серединного масиву», «Керченсько-Таманський виступ», «Керченське валоподібне підняття», «Прикерченське підняття», «Прикерченський блок» тощо. Тобто, одну і ту ж структурно-тектонічну одиницю багато фахівців небезпідставно визначає як прогин, інші – як підняття.

Аналіз досліджень і публікацій. В геологічній літературі ця територія найчастіше визначається як Керченсько-Таманський прогин північно-східного простягання (100-120 х 30-40 км), що має складну, не до кінця вивчену будову та спірну природу. Багатьма дослідниками [3, 4, 5 та ін.] він виділяється як Керченсько-Таманський перикліналь-ний (міжперикліналь-ний, поперечний) прогин, який розділяє Кримські і Кавказькі гірсько-складчасті споруди (рис. 2). В регіональному плані цей прогин розглядають як структурне ускладнення альпійської складчастої області у вигляді депресії з плоским дном і відносно невисокими бортами, яка сформувалась на стику двох орогенних систем з різними глибинними осередками гороутворення. На півночі він з'єднується з Індольським передовим прогином. Південним його обмеженням є Бар'єрна зона антиклінальних піднять-тів (на західному продовженні Анапського виступу). На південному заході він розкривається у прогин Сорокіна.

В останнє десятиріччя згідно зі схемою структурно-тектонічного районування українського сектору Чорноморсько-Азовського регіону, складеної в ДП «Науканафтогаз» (Т.Є.Довжок, І.В. Попадюк та ін., 2006) в межах Прикерченського шельфу почали виділяти Зону прикерченських складок, південно-східним продовженням якої є прогин Сорокіна (рис. 1).

На південь та захід від них, як видно на тій же схемі, в межах акваторії Чорного моря виділяють Західно- та Східночорноморські западини, відокремлені валом Андрусова, який складений полого залягаючими відкладами мезозою (юра-крейда) та кайнозою. Цей вал сполучається з близьким до нього за будовою та повнотою розрізу осадового чохла валом Шатського через підняття Тетяєва.

Згадані вали відмежовують Східночорноморську западину від прогину Сорокіна та близької до нього за внутрішньою будовою Зони прикерченських складок. На відміну від валів Андрусова, Шатського, які, підкреслимо, мають північно-західне простягання як і східно-Чорноморська западина, та вал Тетяєва, відклади крейди, палеогену та неогену в прогині Сорокіна та в межах Зони прикерченських складок інтенсивно дислоковані і зібрані в серію високоамплітудних складок північно-східного простягання, обмежених насувами. Вергентність насувів південна, що виразно відрізняє ці структури від покривів Гірського Криму та його східного занурення.

На південь та захід від них, як видно на тій же схемі, в межах акваторії Чорного моря виділяють Західно- та Східночорноморські западини, відокремлені валом Андрусова, який складений полого залягаючими відкладами мезозою (юра-крейда) та кайнозою. Цей вал сполучається з близьким до нього за будовою та повнотою розрізу осадового чохла валом Шацького через підняття Тетяєва.

Згадані вали відмежовують Східночорноморську западину від прогину Сорокіна та близької до нього за внутрішньою будовою Зони прикерченських складок. На відміну від валів Андрусова та Шацького, які (як і Східночорноморська западина та вал Тетяєва) мають північно-західне простягання, відклади крейди, палеогену та неогену в прогині Сорокіна та в межах Зони прикерченських складок інтенсивно дислоковані і зібрані в серію високоамплітудних складок північно-східного простягання, обмежених насувами. Вергентність насувів південна, що виразно вирізняє ці структури від покривів Гірського Криму та його східного занурення.

На підставі матеріалів сейсморозвідки МСГТ та буріння (переважно на суходолі Керченського півострова) основними елементами тектонічного районування Прикерченського шельфу та прилеглого суходолу по домайкопському комплексу порід визначено субширотно (східно-північно-східно) орієнтовані зони [7]. З південного сходу на північний захід виділяються такі тектонічні зони: Бар'єрна, Південнобортова, Приосьова, Північнобортова, Кореньківська, Краснопольська, Гончаровська, Фонтанівська, Владиславівсько-Восходівська, і Каменська (рис. 3).

На нашу думку, Барьєрну зону, якій чітко відповідає антиклінальна зона, що складається з ланцюга структур валу Андрусова, Тетяєва, Шацького та Паласа (див. рис. 1), варто було би виділити як перехідну від прогину Сорокіна і Зони Прикерченських складок (по всьому їх простяганні) до Східно-Чорноморської западини. Границя між ними є тектонічною, а стик відбувається по насуву з південною вергентністю, що чітко видно на сейсмогеологічних розрізах (рис. 4).

З Бар'єрною зоною може бути пов'язане формування бар'єрного рифу, що прогнозується в юрських відкладах вздовж південного борту прогину Сорокіна (рис. 5). Він, в свою чергу, як такий, що, імовірно, сформувався вздовж зони регіонального розлому, вказує на те, що формування південного борту почалося, напевно, не пізніше юрського періоду.

Таким чином, вже наведених даних достатньо, щоб переконатися, що напрямок простягання структур Прикримського та Прикерченського шельфу відрізняється від структур Схід-



Рисунок 2 – Схема тектонічного районування Східно-Чорноморського регіону за даними [6]. Для Чорного моря (кольором показано глибини поверхні, наближеної до фундамента (синій - глибоко, червоний - мілко); для суходолу кольором відображено топографію Назви основних структур наведені мовою джерела інформації, в якому зазначено, що в основу схеми покладено карту А. Робінсона [Robinson, 1997]

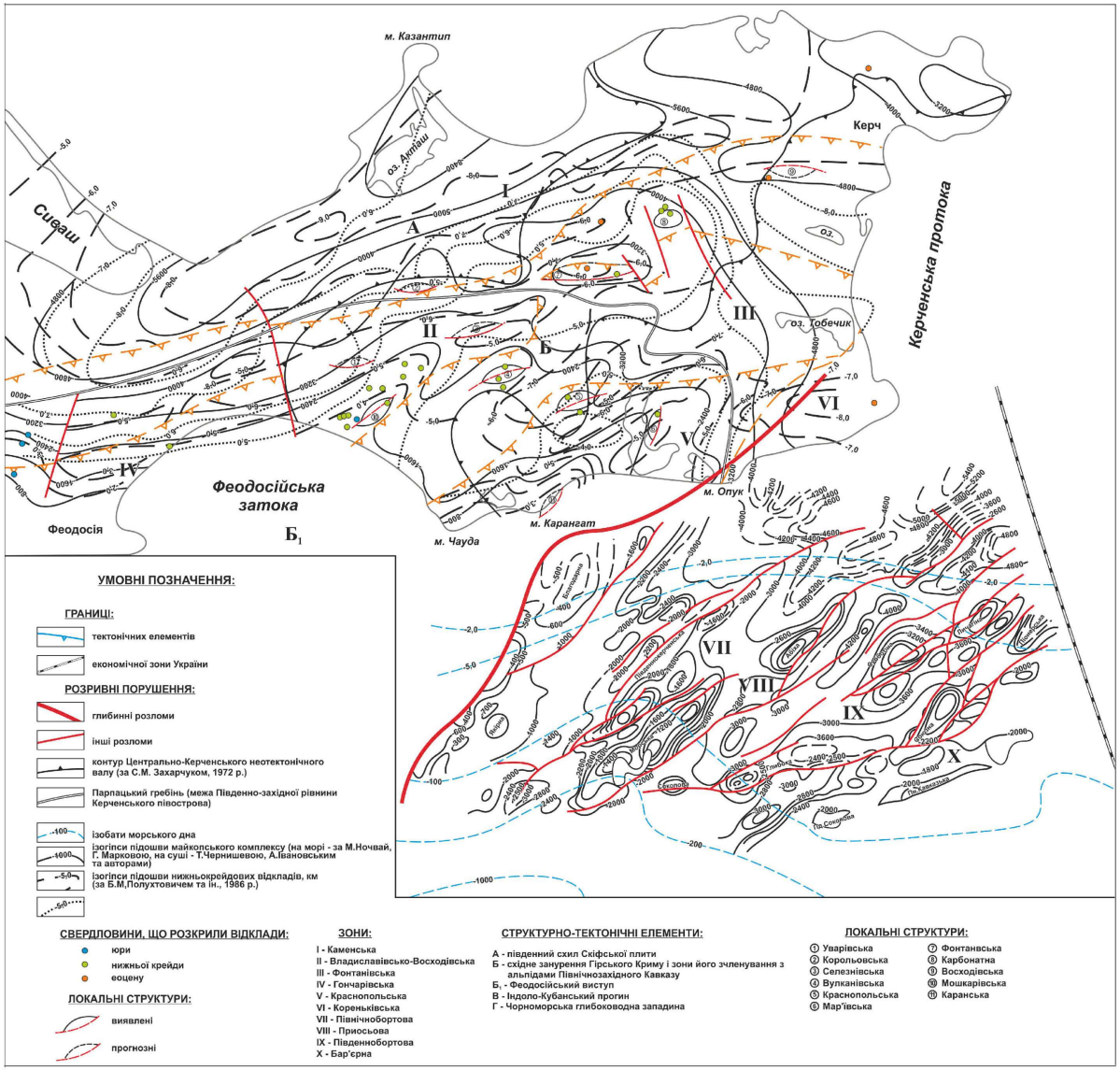


Рисунок 3 – Схематична карта глибинної тектоніки акваторії прикерченського шельфу Чорного моря та прилеглого суходолу (за С.М.Захарчуком та Б.М.Полухтовичем [1])

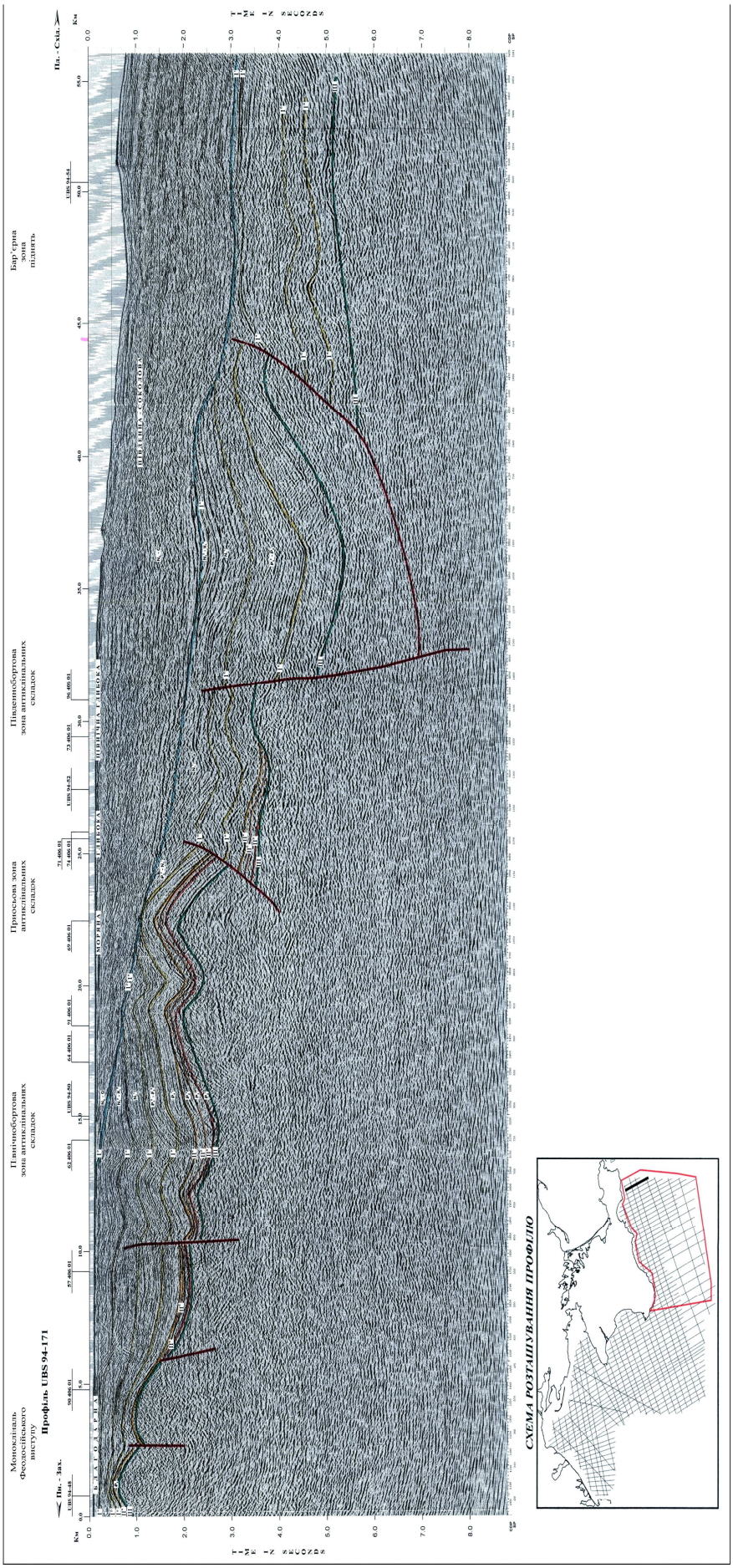


Рисунок 4 - Фрагмент сейсмогеологічного профілю МСГТ 171/94 (М.С.Побєдаш та ін., 2006)

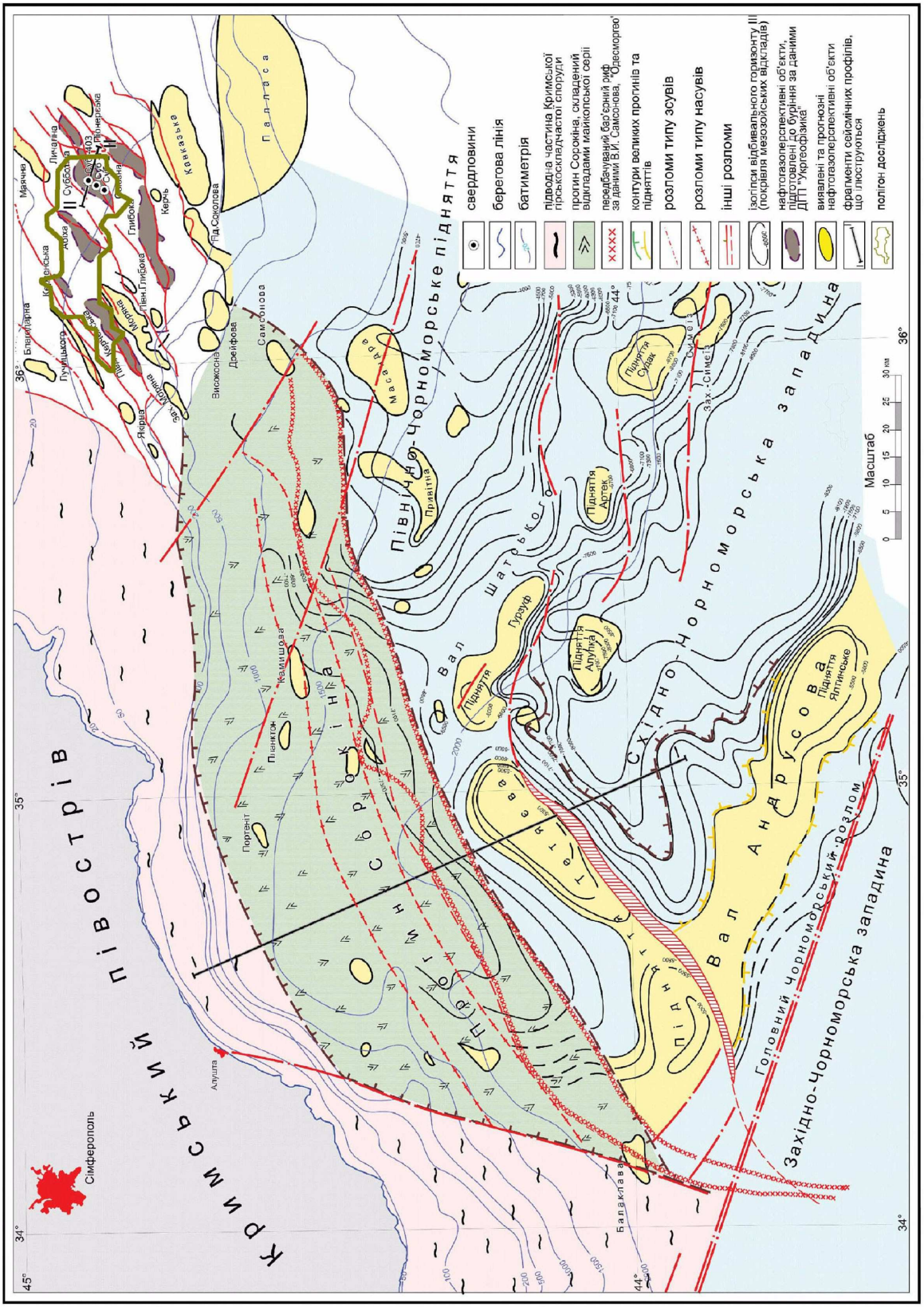


Рисунок 5 – Структурно-тектонічне схема Прикримської та Прикерченської частини акваторії Чорного моря

но-Чорноморського регіону і є загалом поперечним у відношенні перших до других. На цій констатації фактів можна було би і не загострювати увагу, як би не проблема продовження геологорозвідувальних робіт у межах Прикерченського шельфу.

Вирішивши проблемні питання щодо утворення складчастої структури мезозой-кайнозойського чохла Керченського шельфу, вивчивши морфотектоніку потенційних антиклінальних і тектонічних пасток, ми зможемо з більшою ефективністю вести розвідку родовищ, зокрема в межах глибоководної частини Прикерченського шельфа.

Дослідження проблеми і основні результати. На більшості схем [1, 4, 5 та ін.] виявлені сейсморозвідкою локальні структури пов'язуються з похованим Пантікапейським підняттям. Вони мають кулісоподібне розташування і орієнтовані довгими осями на північний схід. На відміну від Індоло-Кубанського передового прогину, де переважають діапірові структури, на Пантікапейському піднятті передбачаються складки загального зім'яття, ускладнені насувами та підкидами північно-східного простягання. Зі складками збігаються гравітаційні максимуми, що інтерпретуються як відображення локальних горстів фундаменту. Згідно з цими уявленнями підняття Субботіна структурно приурочено до центральної частини Пантікапейського підняття із скороченою потужністю осадового чохла. Покрівля домайкопських відкладів тут на 7–10 км вища, ніж в Індоло-Кубанському прогині і Чорноморській глибоководній западині [8]

Згідно з іншими побудовами [9], складчасті структури картуються як лінійні, прирозломні або тектонічно обмежені підняття, що простежуються через увесь прогин, продовжуються у бік Таманського півострова і об'єднуються в декілька зон (Фанагорійська, Карабетівська, Кизилтаська,

Єрьомінська, Благовіщенська, Вітязівська). Антиклінальні зони добре виражені в олігоцені, міоцені, пліоцені і розділені вузькими і глибокими синкліналями та розломами. Це переважно асиметричні брахіантикліналі з короткими і відносно крутими південними крилами та пологими північними. Амплітуда вказаних структур – 200-600 м (по покрівлі майкопської серії – 250-300 м). З глибиною їх амплітуда збільшується до 1000 м.

Суттєво інші структурні побудови для Керченсько-Таманського прогину запропоновано фірмою «Брітішгаз», що виконувала сейсмопрофілювання у 1993 р. у його південній частині. Згідно з цими побудовами, для півдня Керченсько-Таманського прогину характерні високоамплитудні (до 650 м) субширотні насувні асиметричні антикліналі, обмежені з півдня по всій довжині підкидами. Такий стиль складчасто-розривних дислокацій припускається для більшої частини Прикерченського шельфу. На підставі проведеної ними переінтерпретації сейсмопрофілів на площах підняттів Союзне і Привітне, раніше виділених як антикліналі північно-східного простягання, закартована широтна структура Керч-1 [4]. Уточнення підкидо-насувної тектоніки Керченсько-Таманського прогину (на відміну від діапірової, раніше запропонованої за аналогією з дислокаціями Притаманського шельфу) розглядається як одна із першочергових задач стратегічного напряму його освоєння [10].

Згідно з більшістю відомих тектонічних моделей, головна увага у формуванні структурного плану Керченсько-Таманського шельфу приділяється розломам меридіонального і широтного простягань. Субмеридіональна система розломів відноситься до давніх порушень, що проявляються в альпійському структурному поверсі і контролюють границі сучасних тектонічних елементів [4]. Керченсько-Маріупольський меридіональний розлом визначив місце закладання Керченської протоки. Цьому ж розлому відводиться роль межі замикання зануреної частини Керченсько-Таманського прогину. Серед широтних регіональних розломів найбільш впевнено виділяються Північно- і Південно-Кримсько-Кавказький, які контролюють межі альпійських гірськоскладчастих структур і континентального схилу.

Згідно з іншими уявленнями, найбільш масштабні розломи підпорядковані діагональній системі. Північно-східний регіональний Правдинський розлом відокремлює Керченський півострів від Таманського і контролює простягання Керченсько-Таманського прогину.

Практично всі згадані напрямки простягання тектонічних порушень знаходять відображення в схемі лініаментів (рис. 6), виявлених за результатами дешифрування регіональних космічних знімків [8]. В даному випадку звертаємо увагу на широкий розвиток в межах території Прикерченського шельфу кількох систем лінеаментів північно-західного простягання, які наскрізно його перетинають, слідкуючись від Східно-Чорноморської западини до Гірського Криму. Це наводить на думку, що в системі дислокацій осадового чохла в межах Зони прикерченських складок варто також відстежувати тектонічні порушення північно-західного простягання, що, напевно, допоможе встановити тектонічні обмеження антиклінальних структур і встановити причини ундуляції і зміщення осей антиклінальних складок, а від так, встановити межі пасток вуглеводнів.

В 2000 році була опублікована стаття С.В. Поповича про геологічні передумови нафтогазоносності північно-східної частини Чорного моря, яка підвела певну риску у вивченні геологічної будови російського сектору акваторії Чорного моря [11]. В даній статті зазначалося, що Північно-східну частину Чорного моря займає Керченсько-Таманський прогин і глибоководна Чорноморська западина (рис. 7).

У Керченсько-Таманському прогині сейсморозвідкою вивчена верхня частина чохла, яка представлена олігоцен-міоценовими і верхньоміоцен-пліоценовими відкладами.

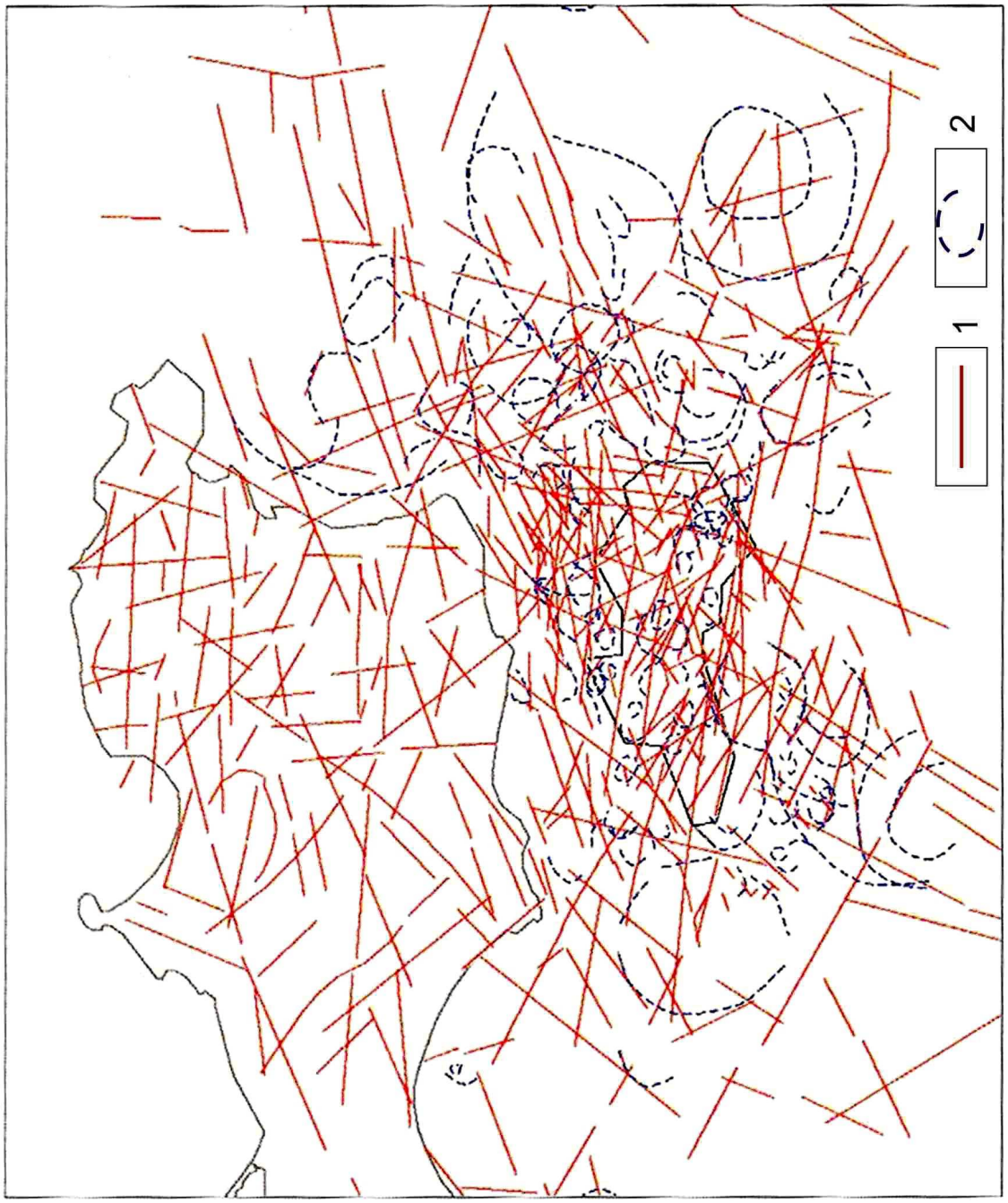


Схема дешифрування космічних знімків: *1* – лініменти; *2* – кільцеві структури

Рисунок 6 – Південно-Керченський шельф

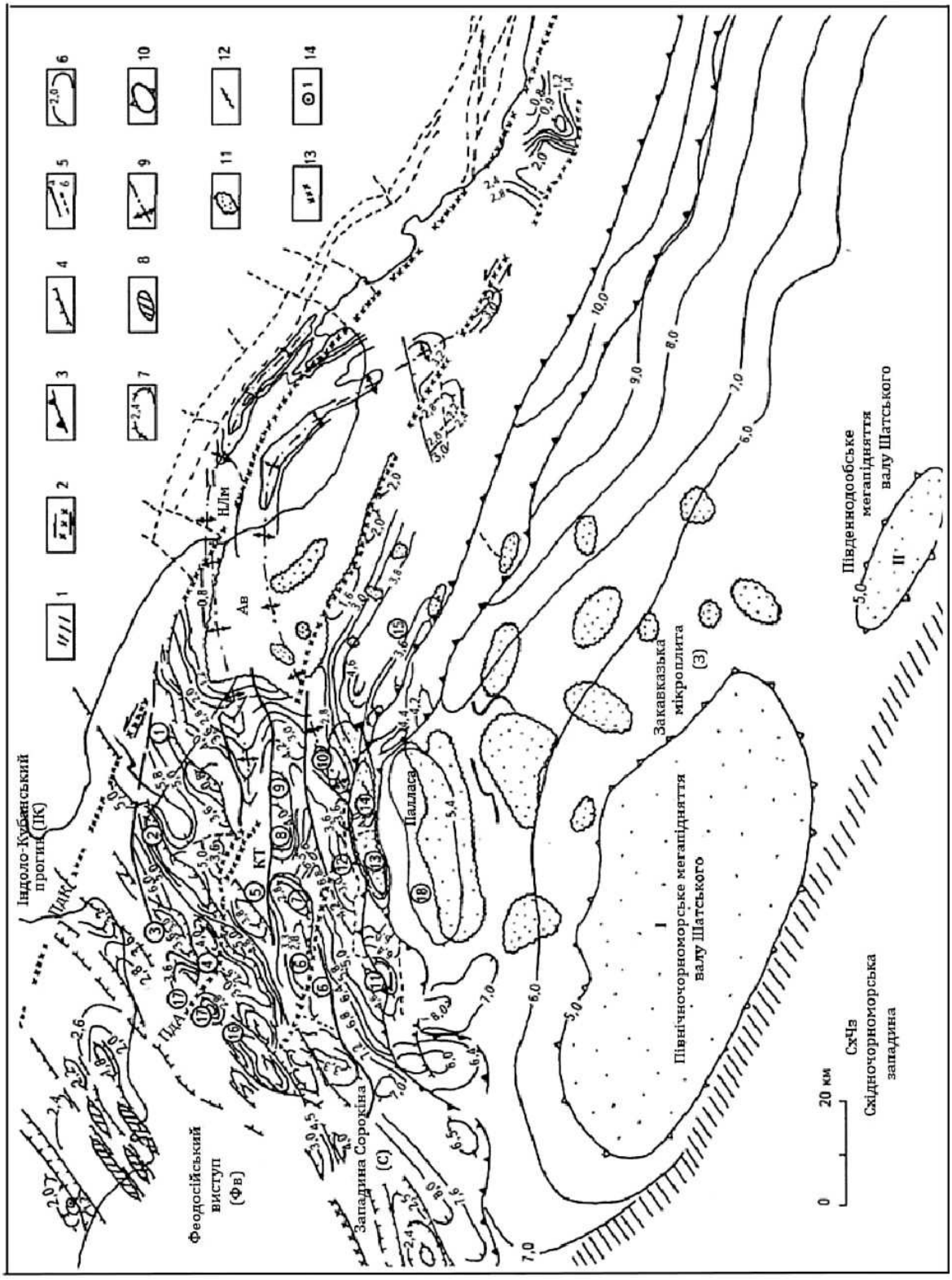


Рисунок 7 – Тектонічна схема Північно-східної частини Чорного моря і суміжних територій суходолу (С.В.Попович, 2001)

В майкопі виділена система лінійно витягнутих антиклінальних зон, субпаралельних одна одній, які протягуються з Таманського півострова в акваторію.

Переінтерпретація 14 тис. км сейсмопрофілів дозволила вперше побудувати на всю акваторію шельфу структурну карту по покрівлі еоцен-верхньокрейдового комплексу (відбиваючий горизонт IIа). Аналіз морфології залишкового гравітаційного поля дав додаткову інформацію для класифікації складчастості і виділення розривних порушень. У залишковому гравітаційному полі діапіровим і криптодіапіровим складкам відповідають від'ємні аномалії, які збігаються з їх склепіннями, що пояснюється дефектом щільності у відкладах верхнього майкопу. Гравітаційні поля з превалюючими від'ємними аномаліями характерні для Керченського і Таманського півостровів, а також для південної частини Азовського моря.

Розривні порушення: 1 – глибинний розлом; 2 – зони розривних дислокацій північно-західного простягання: ПдК – Південнокерченський розлом, ПдА – Південноанапський розлом; 3 – дугоподібна зона підкидів; 4 – підкиди; 5 – поперечні розривні дислокації (а – встановлені, б – передбачувані); 6 – ізогіпси по покрівлі еоцен-палеоцену, км; 7 – ізогіпси відбиваючого горизонту у верхньоміоценових відкладах (область западини Сорокіна), км; 8 – локальні підняття в еоцен-крейдових відкладах; 9 – осі палеоцен-верхньокрейдових антикліналей; 10 – мегапідняття валу Шацького: I – Північночорноморське, II – Південнодообське; 11 – передбачувані верхньоюрсько-нижньокрейдові карбонатні побудови; 12 – границя ерозійного зрізу горизонту IIа; 13 – зона виклинювання верхньоміоценових відкладів; 14 – свердловина Мошкарівська; локальні підняття (цифри в кружках): 1 – Піонерське, 2 – Маячне, 3 – Анісімова, 4 – Абіха, 5 – Субботіна, 6 – Глибоке, 7 – Глибоке-східне, 8 – Безіменне, 9 – Сміле, 10 – Свободне, 11 – Соколова-південне, 12 – Кавказьке, 13 – К-26, 14 – К-27, 15 – А-3, 16 – Південнокерченське, 17 – Вернадського, 18 – Палласа; тектонічні елементи: Фв – Феодосійський виступ мегантиклінорію Гірського Криму, НЛм – Новоросійсько-Лазаревський мегасинклінорій Північного Кавказу, Ав – Анапський виступ, З – Закавказька мікроплита, СхЧз – Східночорноморська западина, ІК – Індоло-Кубанський прогин; КТ – Керченсько-Таманський прогин, С – западина Сорокіна.

В Керченсько-Таманському прогині морфологія гравітаційного поля досить різко змінюється. Тут крупним антикліналям відповідають позитивні аномалії, що не дає підстав вважати їх діапірами. За відбиваючим горизонтом IIа виділені ці складки (локальні підняття Піонерське, Маячне, Абіха, Субботіна та ін.) і встановлено, що вони утворені еоцен-верхньокрейдовими відкладами.

Таким чином, *доведено відсутність в прогині крупних діапірових структур* (С.В. Попович, 2000).

Структуру Керченсько-Таманського прогину можна представити як таку, що складається з кількох систем лінійно витягнутих антикліналей північно-східного простягання, складених еоцен-верхньокрейдовими відкладами, і суміжних з ними вузьких синкліналей, виповнених потужною товщею олігоцен-міоценових відкладів. Синкліналі з нарощуванням потужностей майкопу розкриваються в Індоло-Кубанський прогин. Передбачається, що системи антиклінальних підняттів еоцен-верхньокрейдового комплексу простежуються також в Індоло-Кубанський прогин. При цьому напрямок їх простягання змінюється з північно-східного на північно-західний

Локальні підняття еоцен-верхньокрейдового комплексу Керченсько-Таманського прогину мають асиметричну форму. Для більшості з них (Піонерське, Абіха, Маячне, Анісімова, Субботіна) характерні пологі північно-західні крила і круті, обмежені високоамплітудними підкидами південно-східні крила. Амплітуди горизонтальних зміщень по підкидах досягають 2000-3500 м. Підкиди надійно виділяються на часових розрізах.

У південно-західній частині шельфу структури Південнокерченська і Моряна мають похилі південно-східні і круті північно-західні крила, обмежені розривними дислокаціями.

У морфології гравітаційного поля і хвильових сейсмічних полях Керченсько-Таманського прогину і суміжних тектонічних елементів виділені протяжні розривні дислокації північно-західного простягання, спряжених з підкидами. Намічено три розломи такого простягання: *Південнокерченський, Південноанапський і Феодосійсько-Чорноморський* (С.В. Попович, В.И. Самсонов, И.Н. Сулимов, 1991).

Автори [12], в свою чергу, розглядаючи розломну тектоніку і перспективи нафтогазоносності українського сектора північно-східної частини Чорного моря також встановили, що в межах Прикерченського шельфу тектонічні порушення осадових шарів контролюються розломами консолідованої кори, які чітко простежуються в гравітаційному полі і характеризуються зонами його різких градієнтів. Важливим є те, що крім систем тектонічних порушень субширотного і північно-східного напрямків, в гравітаційному полі також відобразилися тектонічні порушення північно-західного простягання.

Зокрема авторами [12] в районі змикання зони Прикерченських складок з прогином Субботіна виділяють так звану Молбайську розломну зону (рис. 7), яка як і ряд інших регіональних розломів даного регіону трактується як глибинна транскорова структура, імовірно мантійного закладання.

Таким чином, ми доходимо висновку, що існує безліч підстав говорити про широкий прояв в межах Прикерченського шельфу тектонічних порушень північно-західного простягання, які простежуються як в гравітаційних полях, що вказує на їхню глибинність, так і в верхній частині осадового чохла, на рівні наф-

тогазоперспективних відкладів палеоген-неогенового віку.

З переходом до більш детальних методів дослідження суттєво змінилася уява про будову і дислокованість нафтогазоперспективних товщ в межах структурно-тектонічних зон і локальних структур (рисунки 8-10). Так, наприклад, в 2005-2006 р.р. будова структури Субботіна уявлялася значно простішою, а виявлений в майкопських відкладах нафтовий поклад деякими геологами вважався масивним. Проте, за результатами проведених в 2008-2009 р. на площі Субботіна-Абіха сейсморозвідувальних 3-D досліджень будова відповідних структур була деталізована, в результаті чого значно змінилась уява про кількість, напрямки простягання та кінематику структуро-контролюючих порушень, а за результатами буріння параметричної свердловини Субботіна 403 та ще трьох розвідувальних свердловин (Субботіна 1, 2, 3) на родовищі Субботіна доведена випробуванням нафтоносність нижньомайкопських відкладів. Запаси нафти 5 покладів в нижньомайкопських відкладах виявлено в трьох блоках і прогнозуються в четвертому. Подальші перспективи нафтогазоносності родовища Субботіна пов'язуються також з відкладами середнього майкопу (4 пласти у трьох горизонтах), еоцену (2 поклади у двох блоках) і палеоцену (2 поклади у двох блоках).

Характерним є те, що згідно з результатами 3-D сейсморозвідувальних робіт у межах північно-східної перикліналі структури виявлено декілька тектоніних порушень північно-західного (субмеридіанального) простягання, кінематика яких до кінця не вивчена (рис. 9). Однак той факт, що перикліналі ряду структур, наприклад Керчинської, Абіха, Субботіна, Союзна (перший ланцюг), а також Південнокерчинської, Моряна, Глибокої (другий ланцюг) досить чітко шикуються на одній прямій (рис. 8), а зміщення осей антикліналей (наприклад, Мачної структури по відношенню до Абіха, Лачагіна-Субботіна, Піонерська-Союзна, Абіха-Моряна, Глибока-Союзна та ін.) має системний правосторонній знак, наводить на висновок, що північно-східні перикліналі всіх цих структур вірогідно контролюються правосторонніми зсувами.

Відповідну картину можна спостерігати на карті перспективних структур за даними БАРФЗ, складеної фахівцями ТОВ «Юг-нафтогазгеологія» в результаті проведених пошукових аерогеофізичних робіт на Прикерченській ділянці методом багатопозиційного аналізу радіохвильового поля Землі (рис. 10).

Висновки

Таким чином, ми вважаємо доведеним факт широкого розвитку в межах зони Прикерченських складок, в товщі нафтогазоперспективних відкладів палеогену-неогену, структуроконтролюючих тектонічних порушень північно-західного простягання. Пропонуємо при проведенні детальних досліджень геологічної будови антиклінальних пасток вуглеводнів, виявлених в межах Зони прикерченських складок, не зосереджуватись лише на деталізації і відстеженні насувних дислокацій північно-східного простягання, а також приділяти увагу вивченню тектонічних порушень, поперечних по підношенню до осей складок, зокрема правосторонніх зсувів, скидів та підкидів північно-західного простягання. Імовірно, вони можуть бути тектонічним обмеженням для ряду пасток і екранувати поклади вуглеводнів.

Література

1 Гожик П. Ф. Нафтогазоперспективні об'єкти України. Наукові і практичні основи пошуків родовищ вуглеводнів в українському секторі Прикерченського шельфу Чорного моря / [Гожик П.Ф, Євдощук М.І., Гладун В.В., Галко Т.М. та ін.]. - К.: НАН України, ДГС України, Національна акціонерна компанія «Нафтогаз України», 2011. – 576 с.

2 Чебаненко І.І. Розломно-блокова тектоніка в зв'язку з закономірностями розміщення нафтових і газових родовищ України / [І.І. Чебаненко, В.О. Краюшкін, М.І. Євдощук та ін.] // Геодинамика и нефтегазоносносные структуры Черноморско-Каспийского региона (Мат. конф. Гурзуф, 9-14.09.2002). – Симферополь: ассоц. геол. г. Симферополя, 2002. – С. 253-254.

3 Лукин А.Е. Основные закономерности формирования залежей нефти и газа в Черноморском регионе / А.Е. Лукин] // Геология полезных ископаемых Мирового океана. – 2006. – № 3. – С. 10-21.

4 Гожик П.Ф. Нафтогазоперспективні об'єкти України. Наукові і практичні основи пошуків родовищ вуглеводнів у Північно-Західному шельфі Чорного моря / [П.Ф. Гожик, І.І. Чебаненко, М.І. Євдощук та ін.] – Київ-Львів: вид. дім ЕКМО, 2007. – 232 с.

5 Гарецкий Р. Т. Тектоника нефтегазоносных областей юго-запада СССР (объясн. записка к тектонической карте нефтегазоносных областей юго-запада СССР с использованием материалов космических съемок масштаба 1 : 500 000) / [Р. Т. Гарецкий, В. В. Глушко, Н. А. Крылов и др.] – М.: Наука, 1988. – 85 с.; карта – 16 листов.

6 Геологическое строение и углеводородный потенциал Восточно-Черноморского региона / [Афанасенков А.П., Никишин А.М., Обухов А.Н.]. – М.: Научный мир, 2007. – 172 с.

7 Тектоника Украины ; под ред. С.С.Круглова, А.К. Цыпко. - М.: Недра, 1988.– 254 с.

8 Гожик П.Ф. Геолого-структурно-термоатмогеохімічне обґрунтування нафтогазоносності Азово-Чорноморської акваторії / [П.Ф. Гожик, І.Д. Багрій, З.Я. Войцицький та ін.]. – К.: Логос, 2010. – 420 с.

9 Нафтогазоносний потенціал Керченсько-Таманського шельфу Чорного моря, континентального схилу і глибоководної западини Чорного моря / відп. ред. тому М.К. Ільницький, В.П. Клочко, В.С. Токовенко. – Київ: Український нафтогазовий інститут, 1996. – 175 с.



1 –впевнені ізогіпси горизонту відбиття IIа (P_3^1); 2 – невпевнені ізогіпси горизонту відбиття IIа (P_3^1); 3 – межа розповсюдження відкладів майкопу; 4 – рекомендовані свердловини; 5 – скиди; 6 – підкидо-насуви; 7 – тектонічні порушення, що прослідковуються впевнено; 8 - тектонічні порушення, що прослідковуються впевнено

Рисунок 8 – Структурна карта продуктивного горизонту IIа (P_3^1) за результатами узагальнення та комплексної інтерпретації геолого-геофізичних матеріалів в межах Прикерченськог шельфу Чорного моря (склали Маркова Г.Г., Напраснова В.В., Петруньок І.М., ДГП «Укргеофізика», 2003 р.)

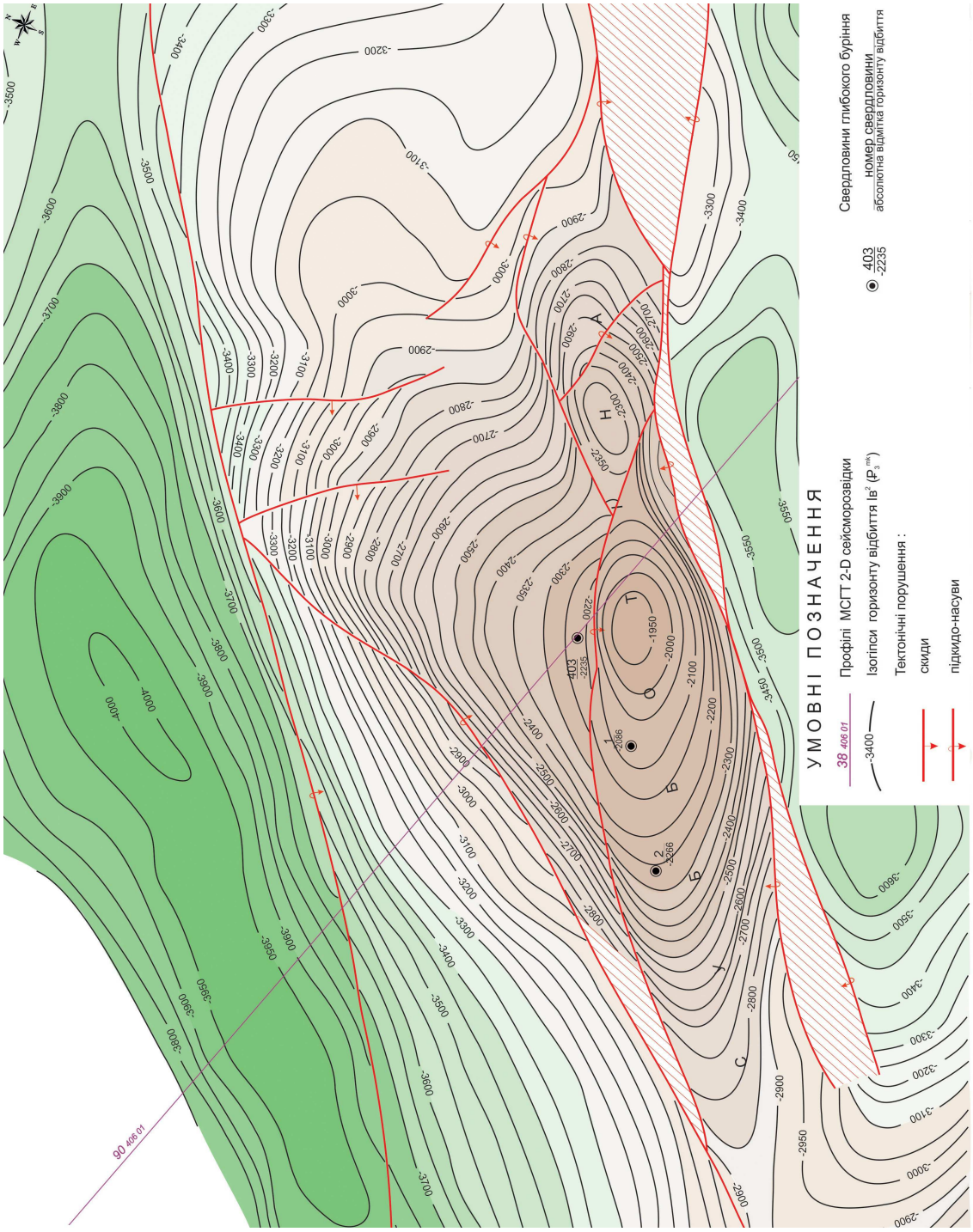


Рисунок 9 - Структурна карта по горизонту відбиття $Iв^2$ (P_3^{mk}) - (верхня частина продуктивного горизонту М-3) за результатами 3-D сейсморозвідувальних досліджень на площі Субботіна-Абіха (склала Маркова Г.Г., ТЦ ДГП «Укргеофізика», 2009 р.)

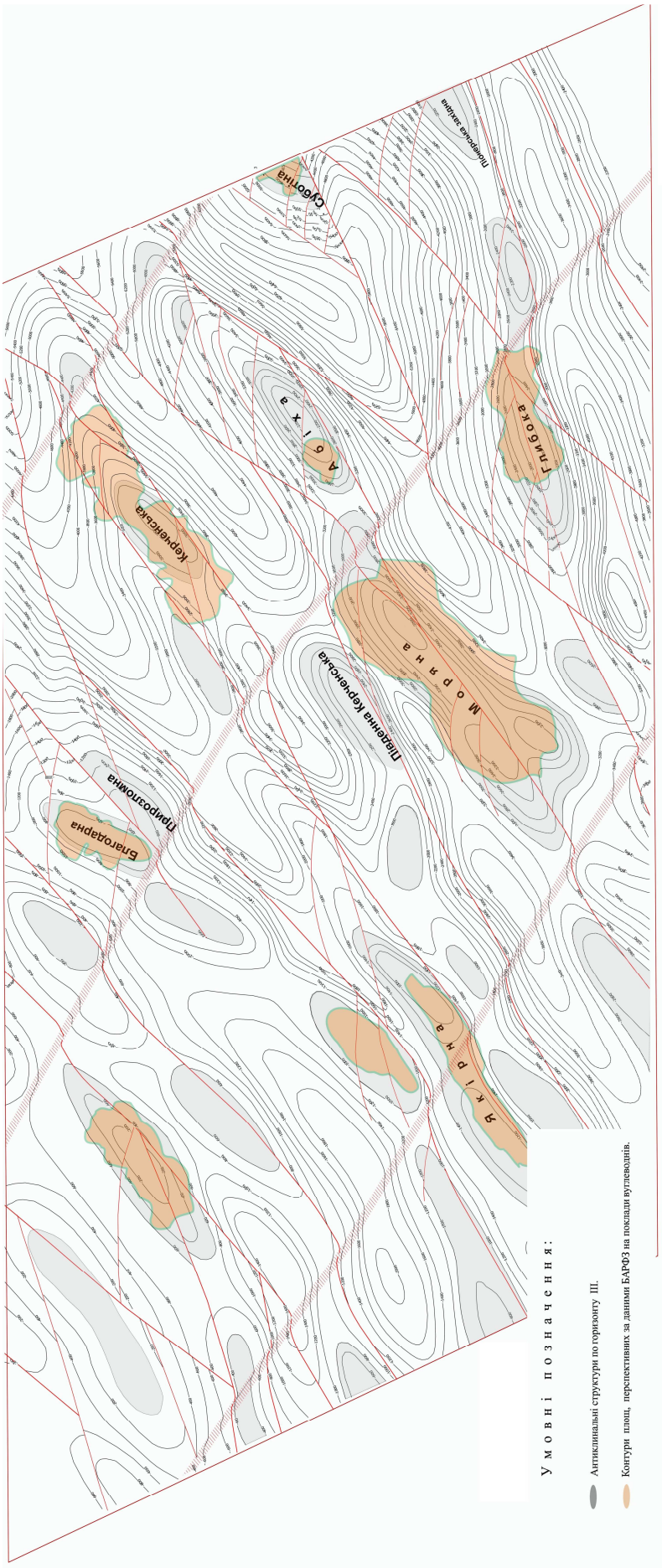


Рисунок 10 - Карта перспективних структур згідно з даними БАРФЗ (за Кулинич М.С., ТОВ «Юг-нафтогазгеологія», 2011р.)

10 Чебаненко І.І. Нафтогазоперспективні об'єкти України. Перспективи нафтогазоносності бортових зон западин України / [І.І. Чебаненко, П.Ф. Гожик, В.О. Краюшкін та ін.]. – Київ: ДП МОУ Воєнне видавництво України "Варта", 2006. – 264 с.

11 Попович С.В. Геологические предпосылки нефтегазоносности северо-восточной части Черного моря // Геология нефти и газа, 2000. – № 6. – С. 14-21.

12 Старостенко В.І. Розломна тектоніка і перспективи нафтогазоносності українського сектора північно-східної частини Чорного моря / [В.І. Старостенко, Б.Л.Крупський, І.К.Пашкевич та ін.] // Нафтова і газова промисловість. – 2011. – № 1. – С. 7-10.

Стаття надійшла до редакційної колегії 07.03.13
Рекомендована до друку професором ***Маєвським Б.Й.*** *(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ) канд. геол. наук* ***Седлеровою О.В.*** *(ЦАКДЗ ІГН НАН України, м. Київ)*

Інформаційні технології

УДК 53.083

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ – СТАН І ПЕРСПЕКТИВИ ДИСТАНЦІЙНОГО НАВЧАННЯ ДЛЯ ТЕХНІЧНИХ СПЕЦІАЛЬНОСТЕЙ

С.А. Чеховський, М.О. Галущак, Н.М. Піндус

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 504612,
e-mail: galuschak@nung.edu.ua, cdn@nung.edu.ua

Висвітлено шляхи створення та розвитку науково-методичного та технічного підґрунтя для ефективного використання дистанційної форми навчання в Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу в умовах швидкої інтеграції поступу інформаційних та комунікаційних технологій в освіту.

Ключові слова: дистанційна форма навчання, інформаційне суспільство, нормативна база дистанційної освіти, електронні навчальні курси.

Рассматриваются пути создания и развития научно-методической и технической основы для эффективного использования дистанционной формы обучения в Ивано-Франковском национальном техническом университете нефти и газа в условиях быстрой интеграции развития информационных и коммуникационных технологий в образование.

Ключевые слова: дистанционная форма обучения, информационное общество, нормативная база дистанционного образования, электронные учебные курсы.

The article highlights the ways of the foundation and development of the methodological and technical framework for the effective distance learning in the Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas in the context of progress rapid integration of information and communication technologies in education.

Keywords: distance learning, information society, the legal framework of distance education, e-learning courses.

Сьогодні, як не парадоксально, прогрес у розвитку країни визначають не виробничі потужності, не природні ресурси, а інтелектуальний людський потенціал. Сучасне інформаційне суспільство ставить перед навчальними закладами ряд завдань з підготовки фахівців, котрі могли б критично мислити, уміли побачити і долати непередбачувані проблеми, що виникають в швидкозмінному реальному житті шляхом використання сучасних технологій та вміння працювати з інформацією, самостійно підвищувати культурний рівень та розвивати інтелект. Вирішенню цих завдань сприяє дистанційна освіта.

Сьогодення в освіті ознаменувалося широким впровадженням технологій навчання з використанням інформаційних систем та сучасних засобів комунікації, зокрема варто вказати на вагоме місце в інноваціях освіти саме дистанційної форми навчання.

Поступ у питаннях щодо організації дистанційного навчання у ВНЗ України відбувся під час громадського обговорення «Проекту положення про дистанційне навчання в навчальних закладах» від 2012 року, де вказано, яким чином та за якими критеріями вищий навчальний заклад (ВНЗ), який прийняв рішення про запровадження дистанційної форми навчання, формує пакет нормативних документів та вимоги до практичної реалізації дистанційної форми, що враховують специфіку та особливості організації навчального процесу та регламентують його діяльність за цим напрямом.

В ІФНТУНГ значна увага приділяється розвитку дистанційної форми навчання, що втілюється шляхом створення науково-методичного забезпечення для ефективного використання інформаційних технологій, зокрема системи Moodle як базової системи дистанційного навчання та психологічна адаптація щодо особливостей дистанційної форми навчання, проведення курсів підвищення кваліфікації для викладацького складу з метою проектування електронних навчальних курсів, а також наукових конференцій та семінарів [3, 1].

Особливої актуальності гнучкість та прогресивність навчальних підходів набуває при розподілі наших випускників на робочі місця за



Рисунок 1 – Обговорення доповідей проректорами Галущаком М.О. та Чеховським С.О.



Рисунок 2 – Виступи професора Кухаренка В.М. та доцента Лучицького Р.М.

фахом підготовки, зважаючи на те, що ІФНТУНГ єдиний нафтогазовий заклад на Україні. До випускників загалом усіх технічних вищих навчальних закладів висуваються додаткові освітні та практичні вимоги, які можна отримати скориставшись широким спектром можливостей власне дистанційної форми освіти. Потреба сучасного суспільства у спеціалістах зумовлює необхідність пошуку нових конструктивних ідей для вирішення проблеми оптимізації та інтенсифікації навчання, здобуття нових знань та удосконалення рівня теоретичної та практичної підготовки. Об'єктивною тенденцією у вищих закладах освіти є скорочення кількості аудиторних годин та збільшення годин, що відводяться на самостійну роботу студентів. Трансформується роль викладача у навчальному процесі: поступово втрачає актуальність функція викладача як основного джерела інформації, він перетворюється на організатора, консультанта, керівника та експерта самостійної роботи студентів. Усе це потребує пошуку більш ефективних засобів навчання, які б виконували у навчальному процесі такі функції, як інформуючу, формуючу, систематизуючу, контролюючу та мотивуючу. Таким вимогам можуть відповідати новітні комп'ютерні засоби навчання, до яких належать електронні посібники, мультимедійні курси, тренінгові програми тощо, що, власне, і формує методичне, програмне та матеріальне забезпечення дистанційного навчання.

На виконання ухвали Вченої ради університету від 29.02.2012 р. про впровадження дистанційного навчання за 12 напрямками підготовки на 2012/2013 н.р. започатковано навчання студентів за скороченим курсом за одним напрямком та повним навчальним курсом за трьома напрямками підготовки.

З метою обміну передовим досвідом та вирішення проблемних питань стосовно розвитку дистанційної форми навчання на теренах України в ІФНТУНГ проведено першу Всеукраїнську науково-методичну конференцію «Дистанційна освіта: стан і перспективи для технічних спеціальностей» об'єднала багатьох науковців, викладачів, методистів – людей, котрим небайдужий стрімкий розвиток сучасних технологій освіти України та цілеспрямоване впровадження та вдосконалення дистанційної форми навчання.

В конференції прийняло участь 120 учасників (в тому числі 21 доктор наук, 61 кандидат наук) з 23 вищих навчальних закладів України та інституту фізики напівпровідників ім. Лашкарьова Національної академії наук України, привітання учасникам конференції надійшло із Швейцарії та Польщі. Конференція відбулася традиційно та в режимі вебінару.

Із вступним словом та привітанням від імені організаторів конференції Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу виступив проректор з науково-педагогічної роботи Чеховський Степан Андрійович.

Запитання проректора з науково-педагогічної роботи, професора Галущака Мар'яна Олексійовича та його коментарі в обговоренні виступів налаштовували учасників на активну та конструктивну роботу

Конференція охопила коло таких важливих питань, як існуюча нормативна база дистанційної освіти в Україні та ІФНТУНГ, проектування віртуальних лабораторних робіт, створення інтелектуальних спільнот для створення віртуальних лабораторних робіт, ліцензоване використання програмного забезпечення, захист авторських прав розробників курсу, створення єдиного ЕНК для гуманітарних дисциплін, психологічні особливості самонавчання. Стосовно цих питань і відбувалася дискусія між учасниками конференції-вебінару, що відбулася в приміщенні проблемної лабораторії (ауд. 1213) та представниками багатьох ВНЗ України, які 11.10.12 приєдналися до вебінару, обговорювали доповіді та ставили свої запитання у чаті.

Основним питанням дистанційного навчання в ІФНТУНГ все ж залишається питання про те, яким має бути дистанційне навчання для технічних спеціальностей, де переважаюча кількість дисциплін – це дисципліни, що передбачають виконання різноманітних лабораторних робіт на унікальних реальних установках і тренажерах у режимі реального часу.

Виступили та взяли участь в обговоренні:

Прокопенко Ігор Васильович, д.т.н., професор заступник директора інституту фізики напівпровідників національної академії наук України про можливість набуття науковцями України та зарубіжжя навичок роботи з сучасними науковими приладами. Детально ознайомив з роботою Центрів колективного користування приладами, створеними на базі провідних установ НАНУ.

Литвин Оксана Степанівна, к.т.н., старший науковий співробітник інституту фізики напівпровідників національної академії наук України про можливі аспекти застосування атомно-силового мікроскопа та набуття навичок роботи з цим приладом (дистанційно).

Кухаренко Володимир Миколайович, професор, завідувач проблемної лабораторії дистанційного навчання ХПІ, який ознайомив учасників конференції з відкритим дистанційним курсом «Проектування E-LEARNING».

Професор Мазур Микола Петрович та професор Гладкий Ярослав Миколайович ґрунтовно ознайомили зі здобутками та особливостями розвитку дистанційного навчання в Хмельницькому національному університеті.

Когут Л.Ф. – завідувач кафедри німецької та французької мови ІФНТУНГ – «Дистанційна освіта на службі саморозвитку особистості», а також подала свої пропозиції підготовки та реалізації навчальних програм і курсів.

Піндус Наталя Миколаївна – керівник Центру дистанційного навчання ІФНТУНГ – «Про ефективність впровадження дистанційної форми в начальний процес ІФНТУНГ» Виступ став своєрідним звітом роботи Центру за час його існування під її керівництвом. Було представлено нормативні документи для дистанційного навчання в ІФНТУНГ та методичні розробки Центру, за допомогою яких і викладачі, і студенти мають змогу навчитися працювати у середовищі Moodle. Персонально для викладачів створено пакет документів (в якому містяться приклади) щодо розробки електронного навчального курсу. Працівники Центру дистанційного навчання проводять консультації та тренінги з питань організації навчального процесу за дистанційною формою, створення електронних навчальних курсів, роботи на платформі Moodle та надають технічний супровід при проходження екзаменаційних сесій.

Степанов Костянтин Валентинович – методист вищої категорії відділу методичного забезпечення навчального процесу Полтавського національного технічного університету ім. Ю.Кондратюка представив доповідь на тему: «Досвід використання технологій дистанційного навчання при викладанні навчальних дисциплін технічного напряму». Костянтин Валентинович розповів про організацію навчального процесу за дистанційною формою навчання та привів функціональну модель системи дистанційної освіти в університеті.

Венгринюк Мирослава Іванівна - доцент кафедри перекладу ІФНТУНГ продемонструвала можливості застосування дистанційного навчання, як елемента організації самостійної та індивідуальної роботи з іноземними студентами при вивченні української мови.

Скрипник Віра Валентинівна старший викладач кафедри педагогіки і психології Одеського обласного інституту підвищення кваліфікації у своїй доповіді загострила увагу учасників вебінару на психологічному аспекті студентів та викладачів, що працюють за дистанційною формою.

Васильєва Ксенія Сергіївна – аспірантка Київського національного університету будівництва і архітектури продемонструвала напрацювання стосовно застосування компетентнісного підходу в дистанційному навчанні. Ксенія Степанівна розповіла про модуль «Репозиторій компетентностей», його призначення і можливості, створення та використання, а також оцінювання компетентностей за допомогою діяльностей Moodle.

Військову кафедру ІФНТУНГ представили полковник Вязніцев Юрій Вікторович - начальник кафедри та майор Станецький Андрій Ігорович - начальник предметно-методичної групи з доповіддю на тему «Досвід впровадження програми для дистанційного тестування у навчальний процес кафедри військової підготовки ІФНТУНГ». У доповіді висвітлено використання програми «Тест КВП ІФНТУНГ» при проведенні поточного та підсумкового контролю рівня засвоєння навчального матеріалу курсантами та студентами, які навчаються на кафедрі та самоконтролю при підготовці до занять, а також створення бази даних тестових завдань програми.

Салижин Юрій Мирославович – доцент кафедри буріння нафтових і газових свердло-



Рисунок 3 – Виступ керівника Центру дистанційного навчання Піндус Н.М.

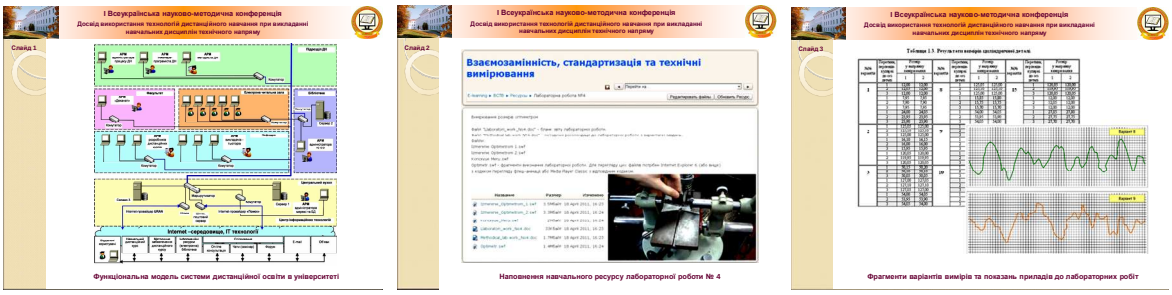


Рисунок 4 – Фрагменти презентації методиста Полтавського національного технічного університету ім. Ю.Кондратюка Степанова К.В.

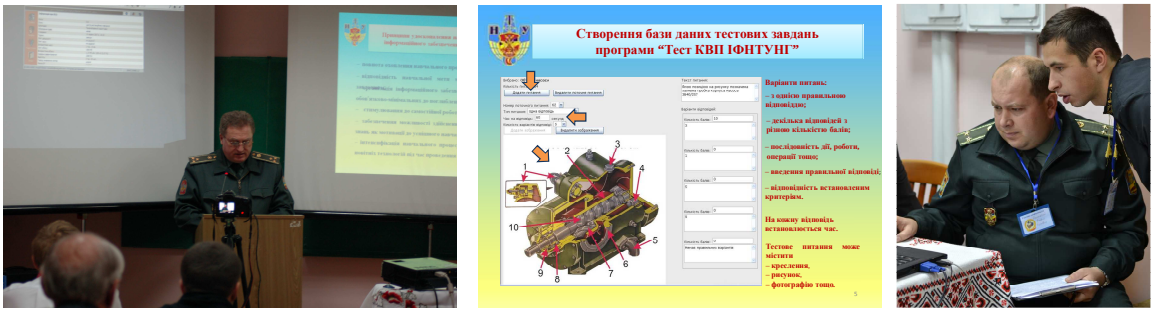


Рисунок 5 – Виступ полковника Вязніцева Ю.В.

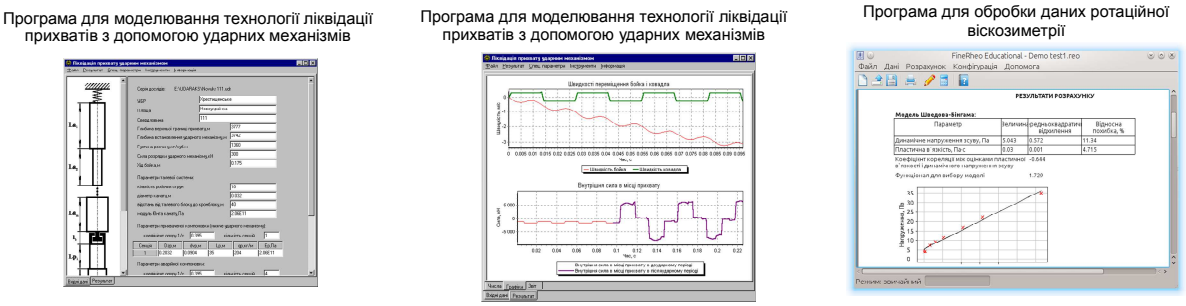


Рисунок 6 - Програмне забезпечення для підготовки студентів технічних спеціальностей

вин ІФНТУНГ представив доповідь на тему: «Програмне забезпечення для підготовки студентів технічних спеціальностей», з демонстрацією програми для моделювання технології ліквідації прихватів з допомогою ударних механізмів та для обробки даних ротаційної віскозиметрії.

Ващишак Сергій Петрович – доцент кафедри ІВТ висвітлив тему: «Застосування програмного пакету Electronics Workbench при дистанційному вивченні курсу «Основи електроніки»». Сергій Петрович виклав основні задачі вивчення дисципліни та продемонстрував їх вирішення з використанням програмного забезпечення Electronics Workbench.

Остапів Володимир Васильович – асистент кафедри ІВТ представив основні підходи до реалізації дистанційних лабораторних робіт із технічних дисциплін та продемонстрував приклади їх реалізації у формі віртуальних вимірювальних стендів на базі Cloud-технологій.

Дискусійними питаннями конференції були особливості та відмінності організації навчального процесу за заочною та дистанційною формою; особливості реалізації віртуальних лабораторних робіт, тестові технології в дис-

3

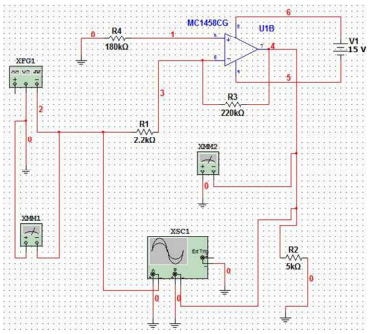
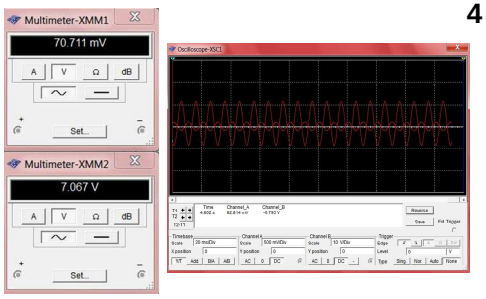


Рис. 1 – Схема підсилювача змінної напруги з використанням операційного підсилювача Середовище Electronics Workbenc

4



а) б)

Рис. 2 – Результати вимірювання напруги на вході та виході підсилювача при частоті 100 Гц та синусоїдальній формі вхідного сигналу в середовищі Electronics Workbenc

Рисунок 7 - Застосування програмного пакету Electronics Workbench при дистанційному вивченні курсу «Основи електроніки»

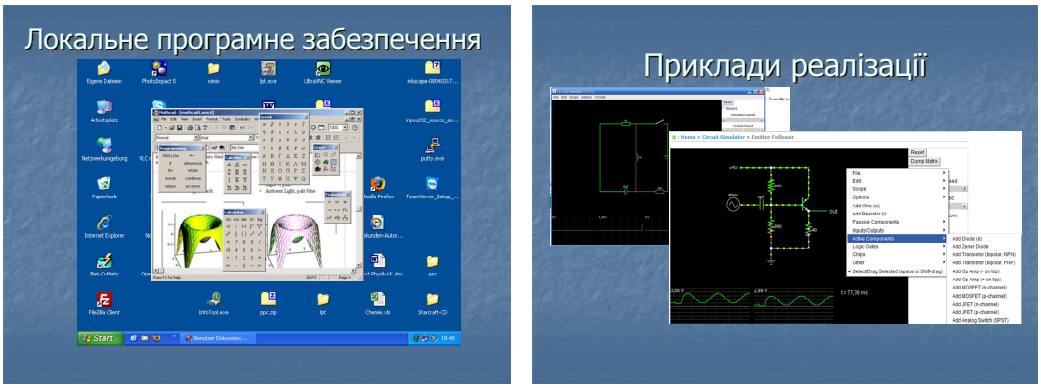


Рисунок 8 - Приклади реалізації лабораторних робіт у формі віртуальних вимірювальних стендів на базі Cloud-технологій



Рисунок 9 - Лекція професора Харківського національного університету радіоелектроніки Захарова І.П. на тему «Неопределенность в измерениях»

танційному навчанні, методичне та програмне забезпечення

На жаль, не всі матеріали, що опубліковані в збірнику тез доповідей були виголошені безпосередньо перед учасниками конференції у зв'язку з обмеженим часом вебінару. Тому більшість учасників конференції знайомилися з надрукованими поданими матеріалами. В усних запитаннях та запитаннях чату, в процесі обговорення виносились питання, що подані в матеріалах докторами технічних наук, професорами, Заміховським Леонідом Михайовичом, Семенцовим Георгієм Нікіфоровичем, Чигуром Ігором Івановичом, Чорноусом Віктором Миколайовичем, Шкіцею Лесею Євстахіною, Петришином Романом Андрійовичем, Витязем Олегом Юлійовичем, Юрчишиним Володимиром Миколайовичем, Навроцьким Богданом Івановичем, Яновським Михайлом Леонідовичем та багато ін.

Значний інтерес в учасників вебінару викликали питання щодо практичної організації навчального процесу за дистанційною формою, на які вичерпну відповідь дав директор інституту фундаментальної, гуманітарної підготовки та заочно-дистанційного навчання, доцент Мазур Мирослав Павлович.

Як приклад реалізації ідей дистанційного навчання великий інтерес викликала лекція Захарова Ігора Петровича на тему «Неопределен-

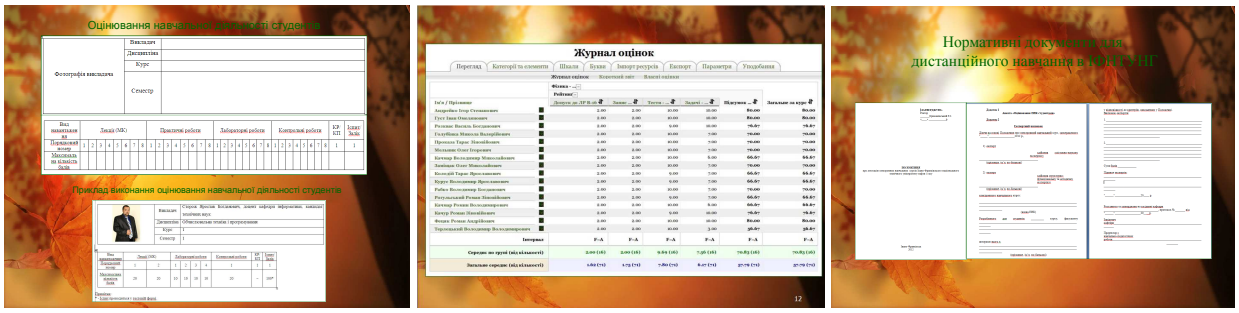


Рисунок 10 – Розробки працівників Центру дистанційного навчання

ность в измерениях». Прочитана з використанням мережі інтернет одночасно для студентів Харківського національного університету радіоелектроніки та Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу.

Практичним досвідом проектування віртуальних лабораторних робіт та створення електронних посібників з демонстрацією конкретних власних напрацювань поділилась Боднарчук Анастасія Петрівна.

Інженер Центру дистанційного навчання ІФНТУНГ Ярошенко Ірина Олексіївна провела тренінг з питань створення електронного деканату та практичної роботи на навчальній платформі Moodle.

Проведена конференція стала добрим середовищем обміну досвідом між людьми, які задіяні і працюють у сфері дистанційної освіти та дозволила заявити про ІФНТУНГ як університет, що не відкидає впровадження та розвиток технологій які сприяють гнучкості та прогресивності в наданні освітніх послуг.

На підставі заслуховування та обговорення 80 доповідей та виступів учасників конференція констатувала наступне:

1. У ВНЗ України існує достатньо потужна та інтелектуально насичена науково-педагогічна база у галузі дистанційної освіти.

2. Більшість провідних ВНЗ України розвивають і впроваджують дистанційну форму в навчальний процес на підставі наказу МОН України № 40 від 9.04.2004.

3. Офіційні веб-сайти більшості ВНЗ містять достатню інформацію, яка розкриває зміст, суть та можливості навчання за дистанційною формою в конкретному ВНЗ .

4. Кількість та якість навчальних підручників та посібників з грифом МОН не повною мірою відповідає потребам проведення навчання за дистанційною формою.

5. Існуючі нормативні документи для формування розкладу та розрахунку навчального часу викладачів орієнтовані на заочну форму навчання і не повною мірою адаптовані до умов дистанційної форми навчання.

6. Діюче Положення про організацію навчального процесу (затверджено наказом Міністерства освіти України від 2 червня1993 р. №161) недостатньо висвітлює можливості і враховує потреби в організації дистанційної форми навчання.

7. Вважати позитивним досвід ІФНТУНГ в запровадженні дистанційного навчання;

- активну участь у формуванні нормативно-правових документів університету за дистанційною формою навчання прийняли: проректори з науково-педагогічної роботи ІФНТУНГ Чеховський С.А. та Галущак М.О; начальник навчально-методичного управління Свирида Б.В.; директор інституту заочно-дистанційного навчання фундаментальної та гуманітарної підготовки Мазур М.П., керівник Центру дистанційного навчання Піндус Н.М. у повній мірі розробили та впровадили в навчальний процес (положення про дистанційне навчання; положення про атестацію електронних навчальних курсів; внесено доповнення до методичних вказівок до складання індивідуального плану роботи викладачаі розрахунку навчального навантаження та інших видів робіт кафедр, додаток до журналу обліку відвідування, поточної успішності і атестування студентів, які вивчають дисципліни за дистанційною (змішаною формою) навчання.

- на стадії інтенсивного створення і впровадження знаходиться сучасна матеріально-технічна, наукова та методична база підготовки фахівців за освітніми рівнями бакалавр, спеціаліст, магістр за дистанційною формою навчання;

- проводиться навчання педагогічних працівників в плані підвищення кваліфікації у напрямках організації навчального процесу, вивчення особливостей та набуття практичних навиків з впровадження інтерактивних методів та сучасного програмного забезпечення в навчальний процес.

За результатами роботи конференція ухвалила:

1. Вважати питання впровадження дистанційної форми навчання для технічних спеціальностей одним з пріоритетних, що мають першочергове значення для розвитку і покращення надання освітніх послуг у ВНЗ України, зокрема в ІФНТУНГ.

2. Вважати за доцільне рекомендувати навчально-методичним управлінням та Центрам дистанційного навчання ВНЗ України продовжити науково-методичні дослідження і впровадження сучасних технологій навчання, направлених на створення нових та удосконалення існуючих навчальних підходів з метою підняття інтелектуального престижу університетів.

3. З метою покращення роботи з абітурієнтами, надання освітніх послуг через дистанційні підготовчі курси та отримання фахової підготовки при вступі на навчання за рівнем бакалавра, спеціаліста і магістра розглянути можливість використання сайтів Центрів дистанційного навчання ВНЗ для розробки та впровадження наступних дистанційних курсів:

- іноземної мови для вступника до ВНЗ;
- іноземної мови для вступника до магістратури;
- іноземної мови за професійним спрямуванням» (технічний аспект, відповідно до напрямку підготовки);
- «ділової іноземної мови»;
- «наукової мови діяльності»;
- математики;
- фізики.

3.1 Започаткувати підготовчі курси із застосуванням дистанційного вивчення певних елементів підготовчих навчальних курсів, вебінарів та дистанційного тестування абітурієнтів.

3.2 Підтримати ініціативу ІФНТУНГ у започаткуванні спільної профорієнтаційної роботи з нафтовим технікумом м. Дрогобича і використанням медійних засобів.

4. Враховуючи достатній рівень науково-методичного забезпечення та розробок ЦДН, рекомендувати ректорату ІФНТУНГ створити проблемну лабораторію дистанційного навчання метою функціонування якої є:

- проведення курсів підвищення кваліфікації викладачів за специфікою дистанційної форми навчання, набуття практичних навичок роботи на навчальній платформі, вивчення роботи електронного журналу;
- проведення тренінгів з метою проектування (з наступною атестацією та видаванням сертифікатів) електронних навчальних курсів;
- проведення лекційних занять, вебінарів, телеконференцій, семінарів;
- проведення занять за дистанційною формою навчання, модульних контролів, екзаменаційних сесій;
- створення зв'язку в освітньому просторі через проведення семінарів, конференцій, телемостів між ВНЗ України та зарубіжжя.

Література

1 Чеховський С.А. Математичне моделювання фізичних процесів: навчальний посібник / С.А. Чеховський. – Івано-Франківськ: Факел, 2003. – 174 с.

2 Курс загальної фізики. Квантова та атомна фізика: навч. посібник для дистанційного навчання / М.О. Галущак, Р.М.Лучицький, Б.М.Рувінський, В.В. Нижникевич. – Івано-Франківськ: Факел, 2008. – 145 с.

3 Технологія розробки дистанційного курсу: навчальний посібник / Биков В.Ю., Кухаренко В.М., Сиротенко Н.Г., Рибалко О.В., Богачков Ю.М.; за ред. В.Ю.Бикова та В.М.Кухаренка – К.:Міленіум, 2008. – 324 с.

Стаття надійшла до редакційної колегії 23.01.13
Рекомендована до друку І Всеукраїнською науково-методичною конференцією «Дистанційна освіта: стан і перспективи для технічних спеціальностей», яка відбулася 10-12 жовтня 2012 р.

УДК 378.147

ДОСВІД ВПРОВАДЖЕННЯ ДИСТАНЦІЙНОГО НАВЧАННЯ З НАРИСНОЇ ГЕОМЕТРІЇ, ІНЖЕНЕРНОЇ ТА КОМП'ЮТЕРНОЇ ГРАФІКИ

Л.Є. Шкіца, І.В. Павлик, О.В. Корнута, Т.О. Пригоровська, М.Є.Стовбенко

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська,15, тел. (0342) ;
e-mail: i k g @ n u n g . e d u . u a

Розглянуто досвід впровадження дистанційного курсу «Нарисна геометрія, інженерна та комп'ютерна графіка» на кафедрі інженерної і комп'ютерної графіки ІФНТУНГ. Представлені методологічні особливості викладання графічних дисциплін, запропоновані практичні рекомендації щодо застосування засобів навчання та шляхи реалізації дистанційного навчання.

Ключові слова: нарисна геометрія, комп'ютерна графіка, викладання графічних дисциплін, дистанційне навчання.

Рассмотрен опыт использования дистанционного курса «Начертательная геометрия, инженерная и компьютерная графика», разработанного на кафедре инженерной и компьютерной графики ИФНТУНГ. Представлены методологические особенности преподавания графических дисциплин, предложены практические рекомендации использования средств обучения и пути реализации дистанционного обучения.

Ключевые слова: начертательная геометрия, компьютерная графика, преподавание графических дисциплин, дистанционное обучение.

Implementing experience of the distance learning courses "Descriptive Geometry, Engineering and Computer Graphics", developed on the Engineer and Computer Graphics Department, has been presented at this article. The methodical features of the graphical disciplines learning were considered, and the practical ways of the educational means usage and distance learning realization were proposed.

Keywords: descriptive geometry, computer graphics, graphic teaching courses, distance learning

Суспільні зміни, що поставили нові завдання перед вищою школою, вимагають перегляду традиційних методів, технологій і засобів викладання. Держава виходить з того, що освіта – це стратегічний ресурс соціально-економічного, культурного і духовного розвитку суспільства, поліпшення добробуту людей, забезпечення національних інтересів, зміцнення міжнародного авторитету й іміджу нашої держави, створення умов для самореалізації кожної особистості. Згідно з Національною стратегією розвитку освіти України у 2012-2021 роках передбачено [1]:

– забезпечення поступової інформатизації системи освіти, спрямованої на задоволення освітніх інформаційних і комунікаційних потреб учасників навчально-виховного процесу;

– запровадження дистанційного навчання із застосуванням у навчальному процесі інформаційно-комунікаційних технологій поряд з традиційними засобами;

– розроблення індивідуальних модульних навчальних програм різних рівнів складності залежно від конкретних потреб, а також випуску електронних підручників.

Дистанційне навчання – цілеспрямований процес інтерактивної, асинхронної взаємодії тих, хто навчає, і тих, хто навчається, між собою і з засобами навчання, індиферентний до їх розташування у просторі і часі, який реалізується в специфічній дидактичній системі. Основою освітнього процесу при дистанційному навчанні є цілеспрямована і контрольована інтенсивна самостійна робота того, хто навчається. Він може навчатися в зручному для себе місці, за індивідуальним розкладом, маючи при собі комплект спеціальних засобів навчання і погоджену можливість контакту із викладачем.

Проблеми та переваги розвитку наукових засад дистанційної освіти активно досліджуються вченими світу. Даній проблематиці присвячені роботи провідних вчених сучасності, таких як Л.Н. Кечиев [1], Путилов Г. П., Тумковский С.Р., Е.Ф. Федорова. Найвагоміший внесок у дослідження інформатизації та дистанційної освіти серед вітчизняних вчених внесли С. Кувшінов, О.В.Фінагіна та багато інших науковців України [2].

Досліджень, присвячених дистанційній освіті, достатньо багато, але невизначеними залишаються практичне використання методики дистанційного навчання конкретних технічних дисциплін, зокрема графічного спрямування.

Враховуючи актуальність окреслених питань, необхідно вдосконалити методологію викладання базових графічних дисциплін при використанні дистанційного навчання студентам технічних ВНЗ. Згідно до поставленої мети, сформульовано такі завдання:

– обґрунтувати теоретичні основи застосування засобів дистанційного навчання у процесі вивчення студентами дисциплін графічного циклу;

– з'ясувати дидактичні ресурси засобів дистанційного навчання з підготовки майбутніх фахівців у ВНЗ для викладання дисциплін графічного циклу;

– проаналізувати існуючу педагогічну практику щодо використання засобів дистанційного навчання для викладання дисциплін графічного циклу;

– узагальнити отриманий досвід щодо використання засобів дистанційного навчання для дисциплін графічного циклу;

– розробити практичні рекомендації щодо застосування методів і засобів навчання.

Для вирішення поставлених завдань були використані наступні методи дослідження:

– теоретичні: аналіз, синтез, узагальнення та класифікація педагогічної, психологічної літератури та педагогічної практики з метою вивчення проблеми дослідження; моделювання та проектування для опрацювання дистанційного навчального курсу;

– емпіричні: тестування з метою виявлення рівнів навчальної успішності, педагогічний експеримент з метою перевірки застосування засобів дистанційного навчання в процесі вивчення студентами дисциплін графічного циклу.

Інтенсифікація всіх сфер виробництва, широке впровадження систем автоматизованого проектування вимагає підвищення графічної грамотності інженерів. Сучасний інженер-конструктор повинен досконало володіти засобами інженерної графіки, вміти моделювати і конструювати об'єкти, вільно орієнтуватись в різноманітних графічних прикладних програмах і, що найважливіше, володіти гнучкістю мислення, вміти перебудовуватись і самостійно освоювати нове в світі інженерних технологій [3]. Використання сучасних технологій в системі вищої освіти надає нові можливості для активізації процесу професійної графічної підготовки студентів.

Окремої уваги в процесі дистанційного навчання заслуговують графічні дисципліни, що відіграють значну роль в підготовці бакалаврів технічного профілю [4]. Використання дистанційних технологій у процесі навчання на інженерно-технічних спеціальностях значно відрізняється від загальноприйнятих підходів до системи дистанційного навчання. Ці відмінності пов'язані з наявністю в навчальній програмі інженерно-технічних спеціальностей великої кількості графічних робіт і проектів. Під час навчання в університеті такі студенти стикаються з необхідністю розробки та опрацювання великої кількості графічної інформації при навчанні на профільних кафедрах. Тому дистанційні курси з графічних дисциплін повинні забезпечити ґрунтовну підготовку майбутніх фахівців.

Основу графічної підготовки студентів у технічному ВНЗ становить комплексна дисципліна „Нарисна геометрія, інженерна і комп'ютерна графіка", що є фундаментальною, загальнотехнічною дисципліною, покладеною в основу інженерної освіти та базовою для навчання студентів більшості технічних спеціальностей.

Нарисна геометрія є граматикою інженерної графіки і вивчає теоретичні основи геометричного моделювання тривимірних об'єктів методом проекційних зображень. Предметом нарисної геометрії є просторові форми та їх відношення. Нарисна геометрія озброює студента методом проекцій, на якому базуються усі інші розділи графічного циклу і застосовують практично всі технічні дисципліни.

Інженерна графіка базується на методі проекційних зображень та вивчає встановлені державними стандартами умовності, спрощення і особливості застосування цього методу до викладення графічної проектно-конструкторської документації. Предметом інженерної графіки є побудова й читання креслень, ескізів, технічних рисунків, схем, які є графічними засобами фіксування, збереження та передавання технічних ідей у процесі їх розробки та реалізації. Інженерна графіка передбачає набуття студентами вмінь і навичок вираження технічних ідей за допомогою креслень, а також розуміння взаємодії складових частин і принципу дії зображуваних на кресленнях технічних виробів.

Комп'ютерна графіка – сучасний інструмент автоматизації, підвищення якості та прискорення проектування. Її предметом є комп'ютерне уявлення інформації про геометричні образи, комплекси технічних та програмних засобів, що дають змогу створювати, аналізувати, редагувати та зберігати інформацію про графічні об'єкти. Необхідність вивчення системи комп'ютерної графіки зумовлена інтенсифікацією інформаційного обміну, вимогами підвищення рівня творчості та продуктивності праці інженера.

Студенти освоюють основні прийоми роботи з креслярсько-конструкторським редактором КОМПАС-ГРАФІК та системою для тримірного моделювання КОМПАС-3D, де вивчають принципи двомірного моделювання креслень, схем та тривимірне моделювання деталей та зборок і, на першому етапі, використовують комп'ютер в якості "електронного кульмана".

Знання, уміння та навички, набуті у ході вивчення курсу, необхідні для вивчення загально-інженерних і спеціальних дисциплін, при виконанні курсових і дипломного проектів, а також в майбутній інженерній діяльності. Оволодіння кресленням як засобом висловлювання технічної думки та виробничим документом відбувається протягом всього процесу навчання.

Мета запропонованих курсів – надати студентам знання, уміння та навички, необхідні інженеру для швидкого та якісного викладання технічних рішень, задумів; підготовки конструкторської документації та інших графічних документів з використанням сучасних графічних систем. Предметом дисциплін є створення, зберігання, обробка моделей графічних об'єктів, їх відображення, підготовка і випуск креслярсько-конструкторської документації засобами комп'ютерної техніки.

У процесі викладання матеріалу нарисної геометрії та інженерної графіки викладач використовує один з найважливіших принципів дидактики - принцип наочності. Наочність сприяє кращому засвоєнню знань, активізує розумову діяльність, мобілізує увагу. Технічні засоби дозволяють демонструвати поетапність графічного розв'язку завдання із можливістю повернення до попереднього кроку, або ж уникнення

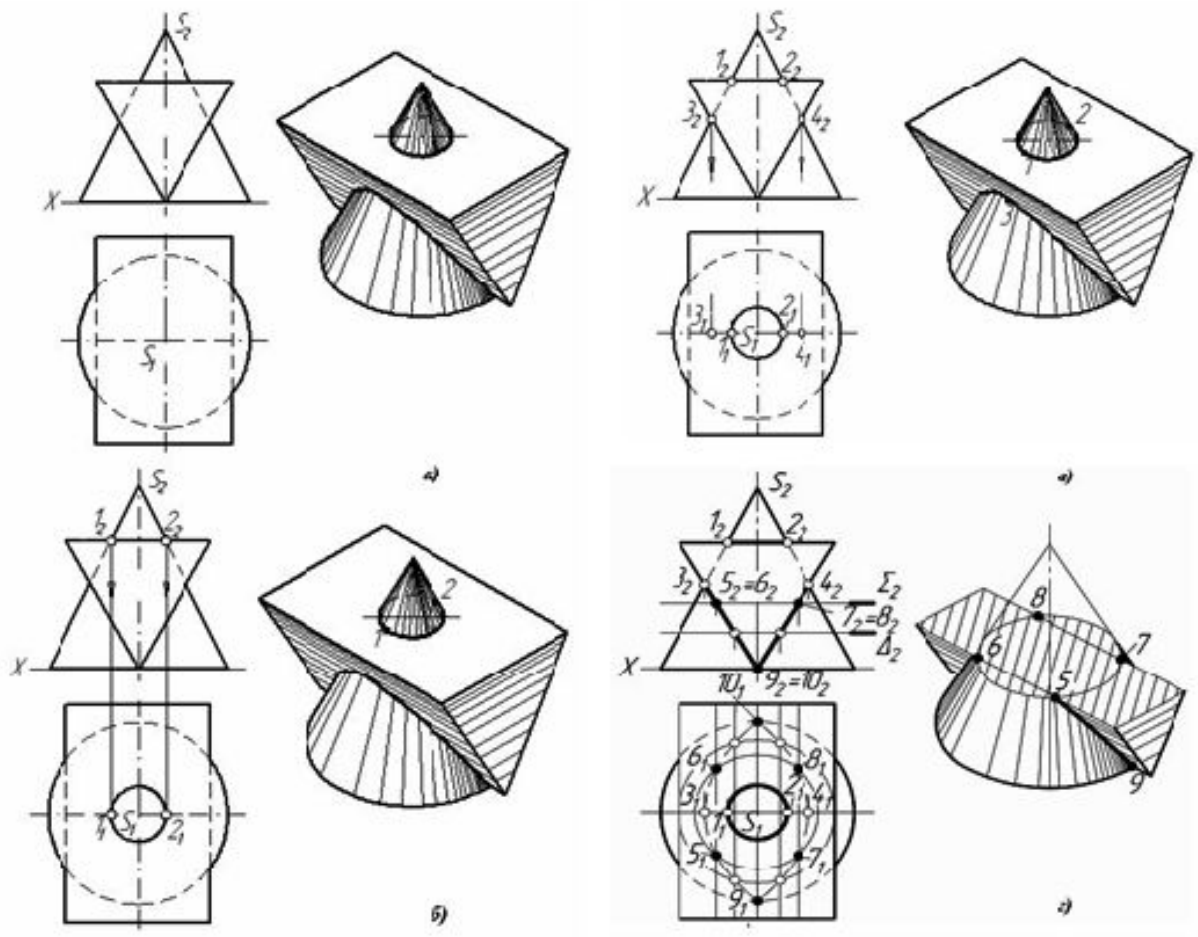


Рисунок 1- Поетапне розв'язання задачі з нарисної геометрії

частини наступних (рисунок 1). Запропонований спосіб подання навчального матеріалу з нарисної геометрії полегшує традиційний, трудомісткий спосіб викладання даної дисципліни, дає можливість демонструвати послідовність проеціювання просторових геометричних форм на площини проекцій, і водночас більш наочно роздивитися взаємне положення різних геометричних образів в просторі, а також прослідкувати логіку вирішення поставленого завдання.

Потрібно зазначити, що інформація, яка подається, є естетичною, має кольорове зображення, а представлений візуальний матеріал легко зарисовується студентом поетапно і зазвичай добре запам'ятовується. Актуальність розглянутого питання підсилюється недостатньою графічною підготовкою випускників шкіл та відсутністю необхідних графічних умінь, які можна набути у вищому навчальному закладі з використанням різного роду навчально-наочних засобів. Навчально-наочний посібник – це навчальне видання, яке містить ілюстративно-наочні матеріали, що сприяють вивченню дисципліни "Нарисна геометрія, інженерна та комп'ютерна графіка" та засвоєнню його змісту візуально [5]. Навчально-наочний посібник дозволяє виконати побудову на епюрі Монжа і при цьому одночасно спостерігати наочне зображення об'єктів і геометричних образів (рисунок 2).

Окремої уваги потребує організація контролю якості знань студента. Сьогодні тестування є одним із найефективніших способів вимірювання рівня знань і досягнень студентів. Воно передбачає застосування однакових методів досліджень щодо великої кількості індивідів, статистичне опрацювання результатів і визначені еталони оцінок. Його використання дає можливість оперативно та надійно здійснювати вимірювання рівня знань і навчальних досягнень і приймати необхідні управлінські рішення для підвищення якості навчання. Власне тест є інструментом, призначеним для вимірювання певних якостей особистості. Він складається з вивіреної системи тестових завдань, стандартизованої процедури проведення та заздалегідь спроектованої технології опрацювання і аналізу результатів [6].

В модулі "Нарисна геометрія" пропонуються тестові завдання за такими темами: точка в системі двох та трьох площин проекцій; пряма лінія; взаємне положення двох прямих; площина; взаємне положення прямої лінії та площини; способи перетворення прямокутних проекцій; гранні поверхні; поверхні обертання; взаємний перетин поверхонь, що практично охоплюють всі теми даного модулю. В кожному завданні наведені варіанти відповідей на питання, один з яких є правильним.

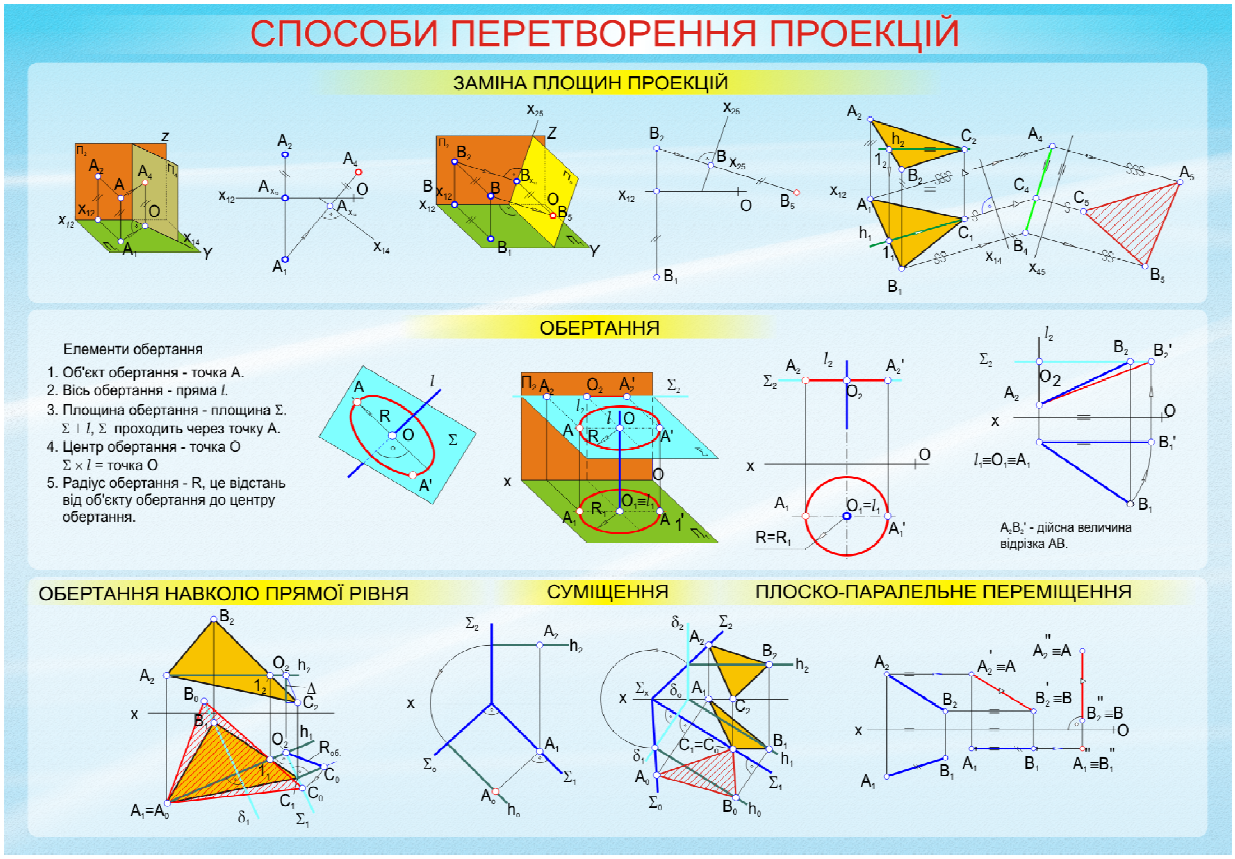


Рисунок 2 – Фрагмент навчально-наочного посібника з нарисної геометрії

Для організації дистанційного навчального процесу в Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу використовується спеціальна система управління - MOODLE. Вона дозволяє розробити курси з певних навчальних дисциплін, а також додаткові матеріали до них - підручники, методичні вказівки для самостійної роботи студентів з курсу, лабораторні практикуми, робочі зошити, робочі програми до вивчення дисциплін; створити навчальні модулі з використанням мультимедійних технологій; розробити тести та індивідуальні вправи для проведення проміжного та підсумкового контролю знань студентів; організувати моніторинг успішності при вивченні курсу. Після зарахування на навчання студент одержує мережевий доступ до необхідних навчальних та методичних матеріалів, орієнтованих на самостійне вивчення.

Розроблені дистанційні проекти складаються з інструктивного блоку, інформаційного блоку (системи інформаційного наповнення ресурсу), контрольного блоку (механізму тестування та оцінки), комунікативного блоку (системи інтерактивного викладання) і керуючої системи, яка все об'єднує.

Зокрема, розроблено загальну структуру дистанційних курсів, які містять:

– робочу програма дисципліни;

– теоретичний навчальний матеріал;

– методичні вказівки до виконання графічних робіт;

– індивідуальні завдання до виконання практичних і лабораторних робіт з прикладами виконання;

– відеокурси до виконання лабораторних робіт;

– питання для самоперевірки;

– тестові завдання для підсумкового контролю знань.

Дистанційні курси є окремою Web-сторінкою, написаною мовою html, де представлено карту сайту. Такий підхід забезпечує наскрізний перехід до будь-якого місця курсу, тобто система взаємопов'язана різного роду гіперпосиланнями для того, щоб студент мав змогу повернутися до того розділу дисципліни, який не був попередньо опрацьований. Доступ до всіх розділів, крім тестових завдань, є вільним для всіх користувачів. Розв'язувати тестові завдання можна, маючи логін і пароль, які студент одержує після зарахування контрольної роботи. Система передбачає зворотній зв'язок, який надає можливість спілкування студентові з викладачами в режимі відкладеного доступу. Таке структурування збільшує функціональність, інтуїтивність і простоту у використанні системи.

Узагальнена структурна схема дистанційного навчального курсу представлена на рисунку 3.

Викладачі кафедри інженерної та комп'ютерної графіки проводять заняття за дистанційною формою навчання за такими напрямками підготовки студентів: «Нафтогазова справа»,

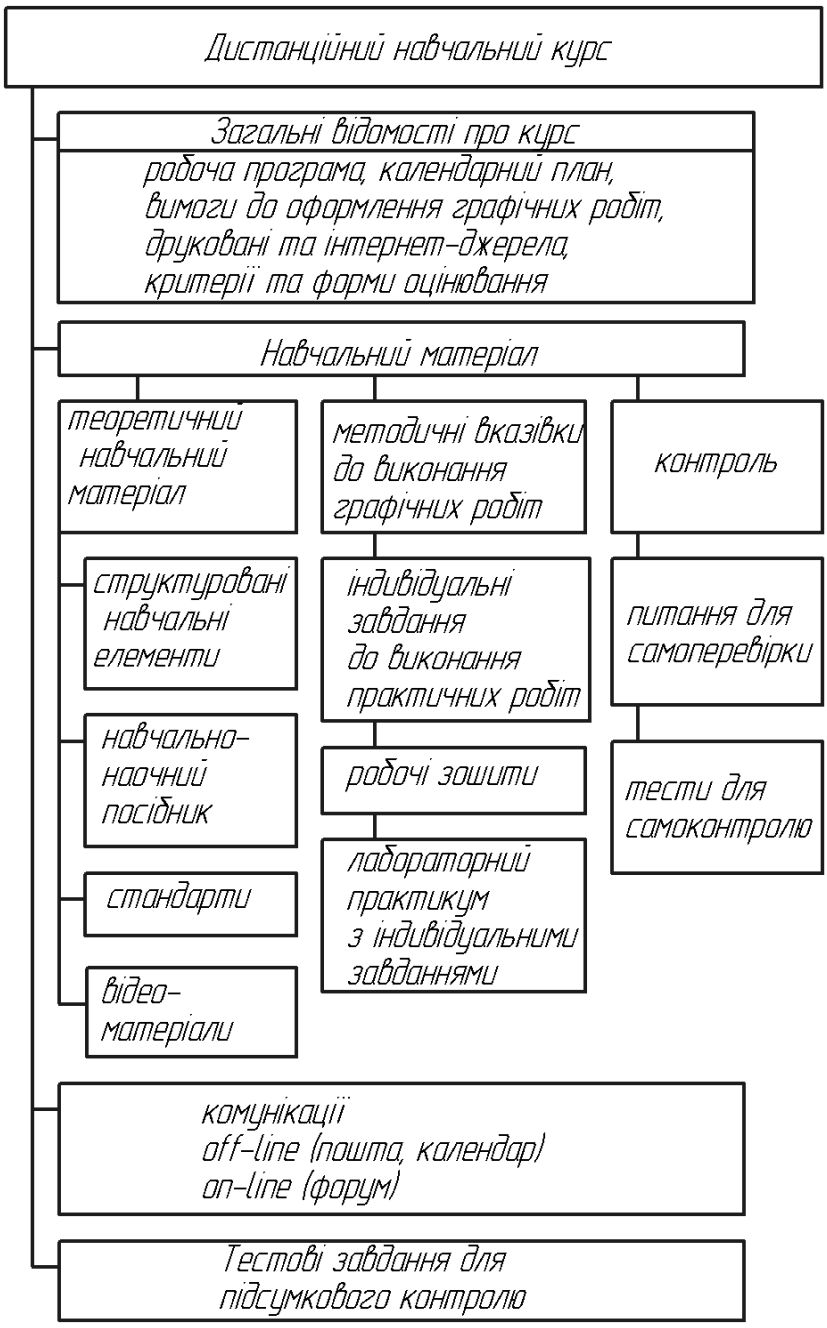


Рисунок 3 – Узагальнена структура дистанційного курсу

«Приладобудування» із нарисної геометрії, інженерної та комп'ютерної графіки. Використовуються засоби дистанційного навчання студентів, які дозволяють найбільш повно реалізувати можливості Інтернет-технологій, зокрема:

– інтеграція очних і дистанційних форм навчання;

– автономні мережеві курси;

– чат-заняття - навчальні заняття, здійснювані з використанням чат-технологій. Чат-заняття проводяться синхронно, тобто всі учасники мають одночасний доступ до чату;

– веб-заняття - дистанційні уроки, конференції, семінари, лабораторні роботи, практикуми та інші форми навчальних занять, що проводяться за допомогою засобів телекомунікацій та інших можливостей Інтернет.

Розглядається можливість використання телеконференцій та відео-лекцій як в он-лайн режимі, так і вигляді відео-версії заняття, представленої на сайті.

Питання навчально-методичного забезпечення нових освітніх технологій в умовах дистанційного навчання є дуже актуальним. В наш час мультимедійних технологій звична форма видання навчально-методичної літератури застаріває. Тенденції розвитку сучасної системи вищої освіти нерозривно пов'язані з широким впровадженням в навчальний процес різних форм, методів і засобів активного навчання. Сучасні комп'ютерні телекомунікації здатні забезпечити передачу знань і доступ до різноманітної навчальної інформації значно ефективніше, ніж традиційні засоби навчання. Інтер-

активні диски з навчальними комплексами та програмами, електронні підручники та інші мультимедійні засоби, доступні через глобальну мережу Інтернет, можуть не тільки забезпечити активне залучення студентів до навчального процесу, але й дозволяють керувати цим процесом, на відміну від більшості традиційних навчальних середовищ. В сучасних умовах частіше починають використовуватися електронні підручники як нову форму подання навчального матеріалу.

Електронний підручник може містити теоретичний матеріал, практичні завдання з прикладами виконання, тести та інші методичні форми закріплення і контролю знань. Авторами розроблені електронні навчальні посібники, методичні вказівки з вивчення дисципліни та виконання контрольних робіт, робочі зошити з нарисної геометрії, інженерної графіки та лабораторні практикуми з комп'ютерної графіки. Навчальні посібники містять теоретичний матеріал та списки рекомендованої літератури. Методичні вказівки з вивчення дисципліни та виконання контрольних робіт містять багатоваріантні завдання контрольних графічних робіт і приклади їх виконання та оформлення. Робочий зошит містить вихідні дані для виконання вправ і вирішення практичних завдань для самостійного опрацювання теоретичного матеріалу. Для виконання завдань необхідні сторінки робочого зошита рекомендується роздрукувати, розв'язати запропоновані графічні задачі та переслати на перевірку викладачеві. Зошит побудовано за принципом від простого до складного. У зошиті представлено як обов'язкові завдання, так і альтернативні щоб стимулювати студентів до самостійного вибору та творчості. На вибір пропонуються завдання різних рівнів складності. Студент має зробити вибір між запропонованими, причому існує обов'язковість вибору. Використання альтернативних завдань має активізувати студента, оскільки при виборі він має зважити усі плюси та мінуси різних варіантів, аналізуючи умови завдань та оцінюючи свої можливості. При виборі завдань він орієнтується на свої інтереси, що підвищує мотивацію виконання завдання. Зазначимо, що базовий навчальний матеріал пропонується в обов'язкових завданнях і це виключає можливість неповного засвоєння навчальної програми. За вказаним викладачем графіком студенти надсилають короткі звіти за наданою формою, а вже потім передбачаються індивідуальні online-консультації. Паперову версію робочого зошита студенти надають для перевірки викладачу під час очних консультацій у період заліково-екзаменаційної сесії. У підготовці до сесії робочий зошит слугує студентам доречним та корисним засобом, у якому зібрані всі необхідні навчальні матеріали. Зазначимо також і той факт, що однією з умов допуску до заліково-екзаменаційної сесії за навчальною дисципліною є правильно виконана певна кількість завдань, включаючи і альтернативні.

Згідно з робочою програмою дисципліни в 1-му семестрі студенти вивчають розділ нарисна геометрія. Семестровий контроль у формі іспиту. В 2-му семестрі вивчається розділ «Інженерна та комп'ютерна графіка», який базується на методі проекційних зображень. Предметом технічного креслення є побудова та читання креслень, ескізів, технічних рисунків, схем, які є графічними засобами фіксування, збереження та передавання технічних ідей у процесі їх розробки та реалізації. Він складається із трьох змістових модулів: «Геометричне та проекційне креслення», «Зображення з'єднань деталей», «Конструкторська документація». Семестровий контроль – залік. Модуль «Комп'ютерна графіка» складається з двох змістових модулів «Двомірна графіка» та «Тримірна графіка». Семестровий контроль – залік.

Курс дистанційного навчання розроблений на модульній основі: кожен модуль (нарисна геометрія; інженерна та комп'ютерна графіка) – це стандартний навчальний продукт, що містить чітко визначений обсяг знань і вмінь, призначений для вивчення протягом певного часу, та завершується контрольною роботою, а також тестовими, заліковими або екзаменаційними засобами контролю [7, 8]. Основні вимоги до побудови такої структури: логічність виділення структурної одиниці, видимість її зі змісту розділу, наявність для студента можливості прямої навігації з будь-якої структурної одиниці в будь-яку іншу, логічно з нею пов'язану, можливість переходу між розділами курсу. Під час розроблення курсу бралося до уваги ізольованість студента, що навчається дистанційно. Матеріали забезпечувалися необхідними поясненнями, були дружніми до користувача, всі складності процесу вивчення автори намагалися передбачити. Методичні посібники були побудовані таким чином, щоб студент міг перейти від навчання під керівництвом викладача, до самостійного навчання, до максимальної заміни викладацького контролю самоконтролем. Тому в них міститься докладний покроковий опис розв'язків задач з нарисної геометрії, критеріїв правильності рішень, тести для самоконтролю з відповідями.

Вікно дистанційного курсу «Нарисна геометрія, інженерна та комп'ютерна графіка» в програмі Moodle 1.9.15 зображено на рисунку 4.

Теоретичний блок у відповідності до робочої програми складається зі змістових модулів, навчальний матеріал повинен бути чітко організований, поділений на невеликі, логічно завершені фрагменти з використанням, малюнків, схем, що забезпечує наочність і краще засвоєння інформації. Інтерфейс користувача цього електронного посібника включає систему вкладених підкаталогів, що забезпечують переходи по розділах посібника, пошук необхідної інформації, словник ключових термінів, блок перегляду графічних ілюстрацій, виклик інтерактивних вправ і контролюючого комплексу (рисунок 5). У розділі інженерної графіки, поряд із загальними правилами виконання креслень, введений значний обсяг нормативно-довідкового матеріалу, покликаного надати істотну допомогу у виконанні контрольних завдань та

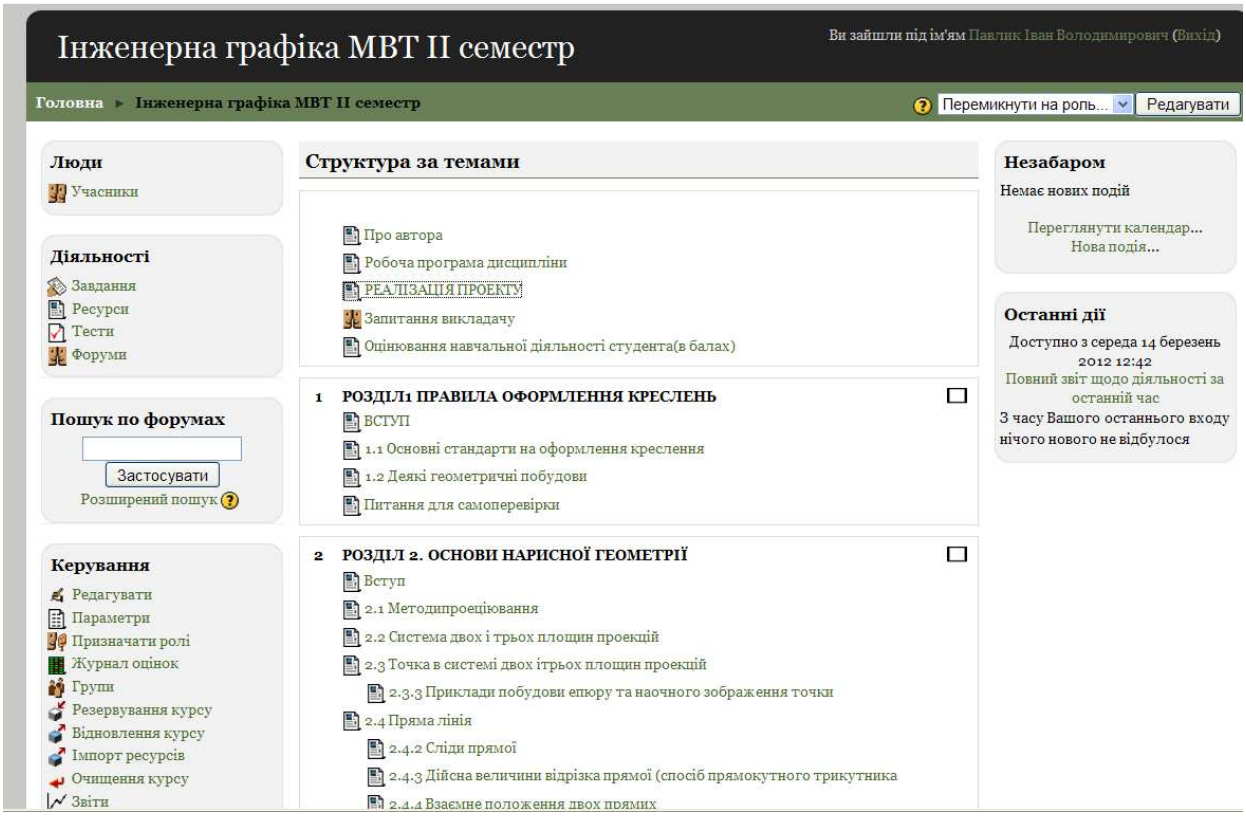


Рисунок 4 – Вікно дистанційного курсу в програмі Moodle 1.9.15

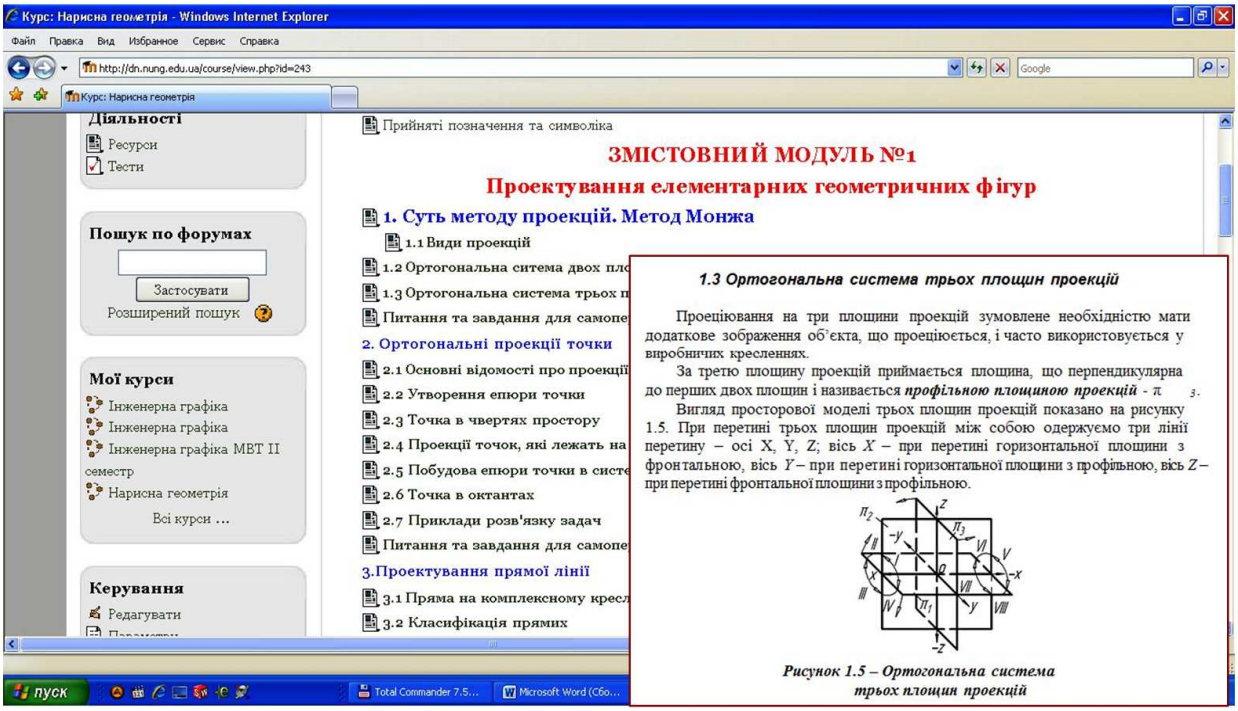


Рисунок 5 – Матеріали електронного підручника

реальних курсових проектів. Поряд з плоскими кресленнями тут наведено велику кількість об'ємних тривимірних зображень, пояснюючих, наприклад, правила побудови зображень-видів, розрізів, перерізів тощо. Широко представлені розділи, що демонструють правила постановки розмірів і значень шорсткості поверхонь, зображення різьбових кріпильних виробів і з'єднань, правила виконання креслень роз'ємних і нероз'ємних з'єднань, послідовність ескізування деталей машин та етапи виконання креслень складальних одиниць, їх деталювання.

Система контролю має систематичний характер і будується як на основі оперативного

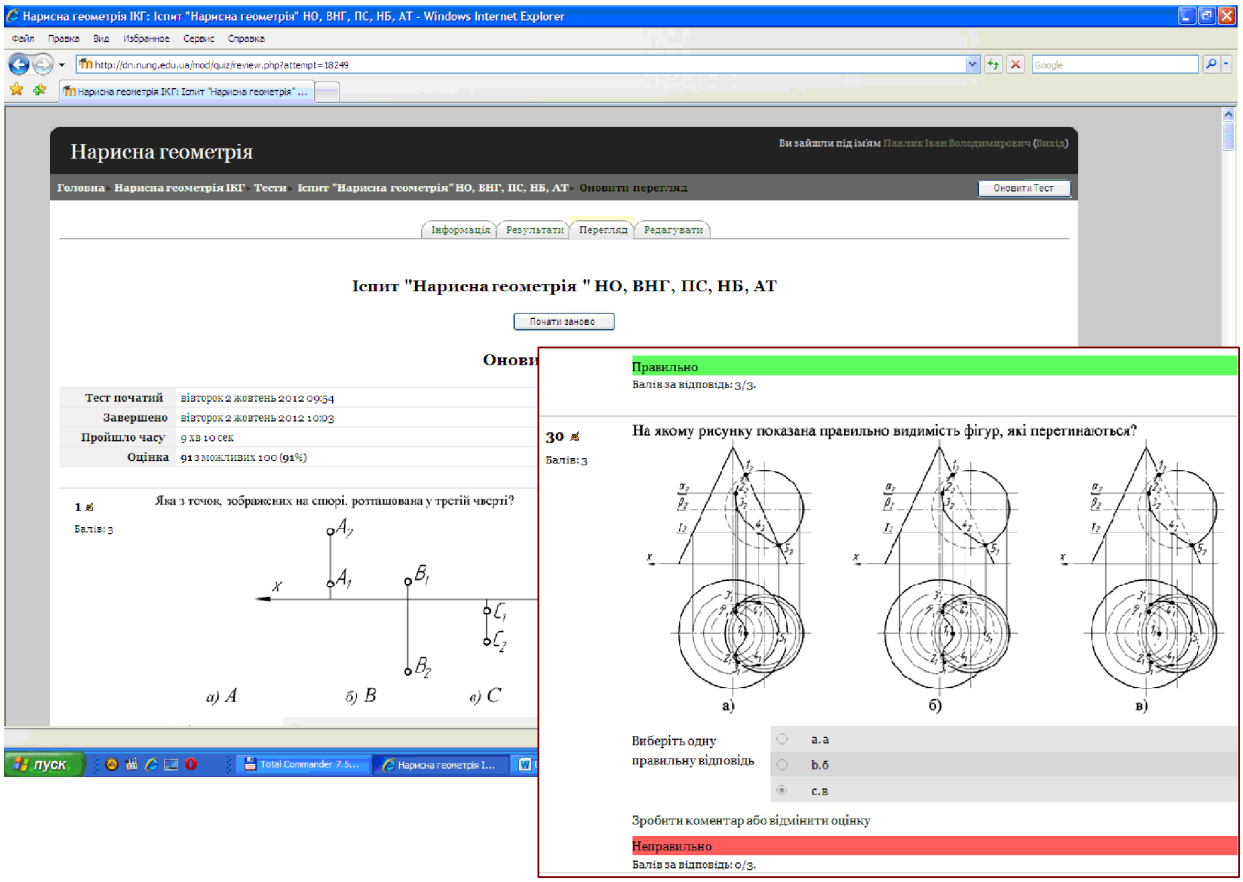


Рисунок 6 – Приклад іспитових завдань та аналізу помилок

зворотного зв'язку (звернення до викладача в будь-який зручний для студента час на форумі) та автоматичного контролю (через системи тестування).

Контроль по завершенню першого модуля «Нарисна геометрія» здійснюється у вигляді іспиту. Іспитове завдання містить 30 тестових завдань трьох рівнів складностей, кожне з яких передбачає одну правильну відповідь (рисунок 6). Для іспиту передбачено 1 годину. Протягом цього часу студент може повертатися до питань та редагувати відповіді. Після завершення іспиту студент має можливість побачити свої помилки.

Розроблений курс – це не тільки сам текст занять, а цілісний процес, що містить пошук необхідної інформації в мережі, обмін листами, як з куратором курсу, так і з іншими студентами, звернення до баз даних. Під час створення курсу необхідно було враховувати, з одного боку, загально-дидактичні принципи створення навчальних курсів, вимоги, що диктуються психологічними особливостями сприйняття графічної інформації з екрана і на друкованій основі (оскільки будь-які графічні побудови можуть бути виведені за допомогою принтера на папір, але, враховуючи значний обсяг курсу, це економічно недоцільно), ергономічні вимоги, а з іншого, максимально використовувати можливості, які надають нам програмні засоби телекомунікаційної мережі та сучасні інформаційні технології.

У зв'язку з встановленим порядком перевірки та приймання виконаних студентами контрольних робіт хотілося б розглянути деякі проблеми, які виникають в процесі навчання графічним дисциплінам. За діючого рівня організації навчального процесу дистанційного спілкування викладача та студента, що виконує графічні роботи, може розвиватися за такими сценаріями. Виконані традиційним способом (з використанням креслення на папері) контрольні графічні роботи (рисунок 7) перед процедурою захисту повинні пройти проміжну перевірку та рецензування викладачем з метою виявлення та виправлення студентом помилок і недоробок. У разі великої відстані між місцем проживання студента та вищим навчальним закладом креслення на перевірку можна переслати традиційною або електронною (у відсканованому вигляді) поштою. Рецензія на перевірену контрольну роботу може бути відправлена студенту електронною поштою або з використанням інших доступних телекомунікаційних засобів, наприклад, у формі текстового файлу. У разі виникнення запитань у студента можливо спілкування сторін в режимі Online у форматі чату або іншим способом. Коригування та внесення змін безпосередньо до відсканованого креслення при такій організації спілкування викладача та студента є неможливим.

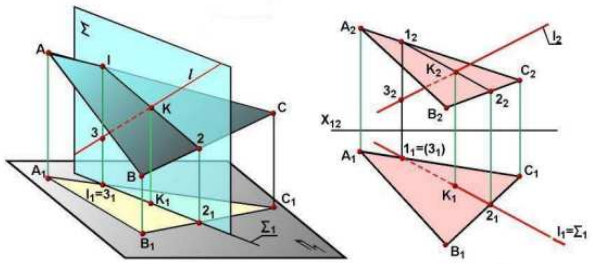
Використання комп'ютерних технологій, зокрема графічних систем або систем автоматизованого проектування при виконанні контроль-

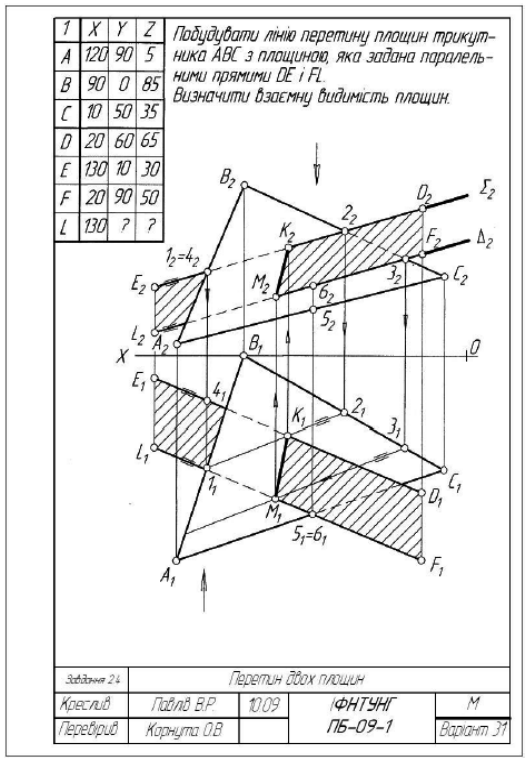
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Кафедра інженерної та комп'ютерної графіки

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до контрольних робіт з інженерної графіки
(частина І – нарисна геометрія)

Для студентів заочної та дистанційної форми навчання





1	X	Y	Z
A	120	90	5
B	90	0	85
C	10	50	35
D	20	60	65
E	130	10	30
F	20	90	50
L	130	?	?

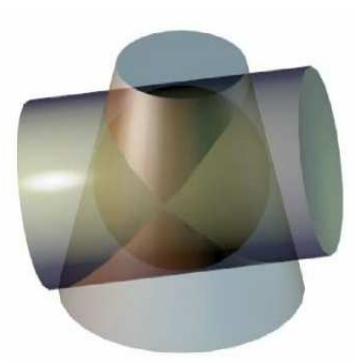
Рисунок 3.3 – Приклад виконання завдання 3.3

22

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Кафедра інженерної та комп'ютерної графіки

РОБОЧИЙ ЗОШИТ
до практичних занять з інженерної графіки
(частина І – нарисна геометрія)

Для студентів заочної та дистанційної форми навчання

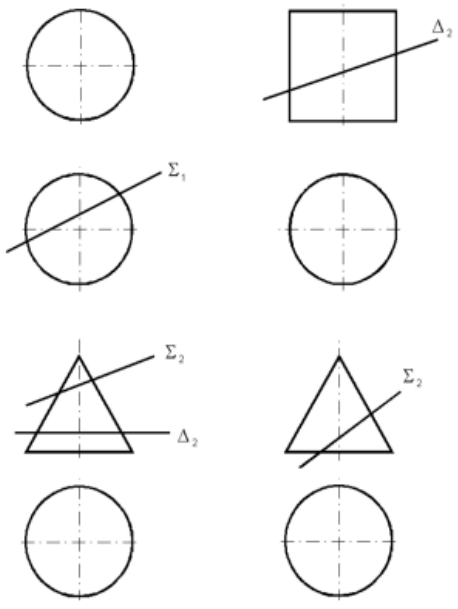


6. ПЕРЕРІЗ ПОВЕРХНІ ПРОЕКТУЮЧОЮ ПЛОЩИНОЮ

Питання для самопідготовки.

1. Що можна одержати (які фігури чи криві лінії) при перерізі сфери площиною?
2. Що можна одержати (які фігури чи криві лінії) при перерізі поверхні циліндра площиною?
3. Що можна одержати (які фігури чи криві лінії) при перерізі поверхні конуса площиною?
4. Які точки лінії перерізу називають опорними?

Задача 19. ***Побудувати проекцію перерізу поверхні площиною.***



17

Рисунок 7 – Приклади завдань з нарисної геометрії і інженерної графіки

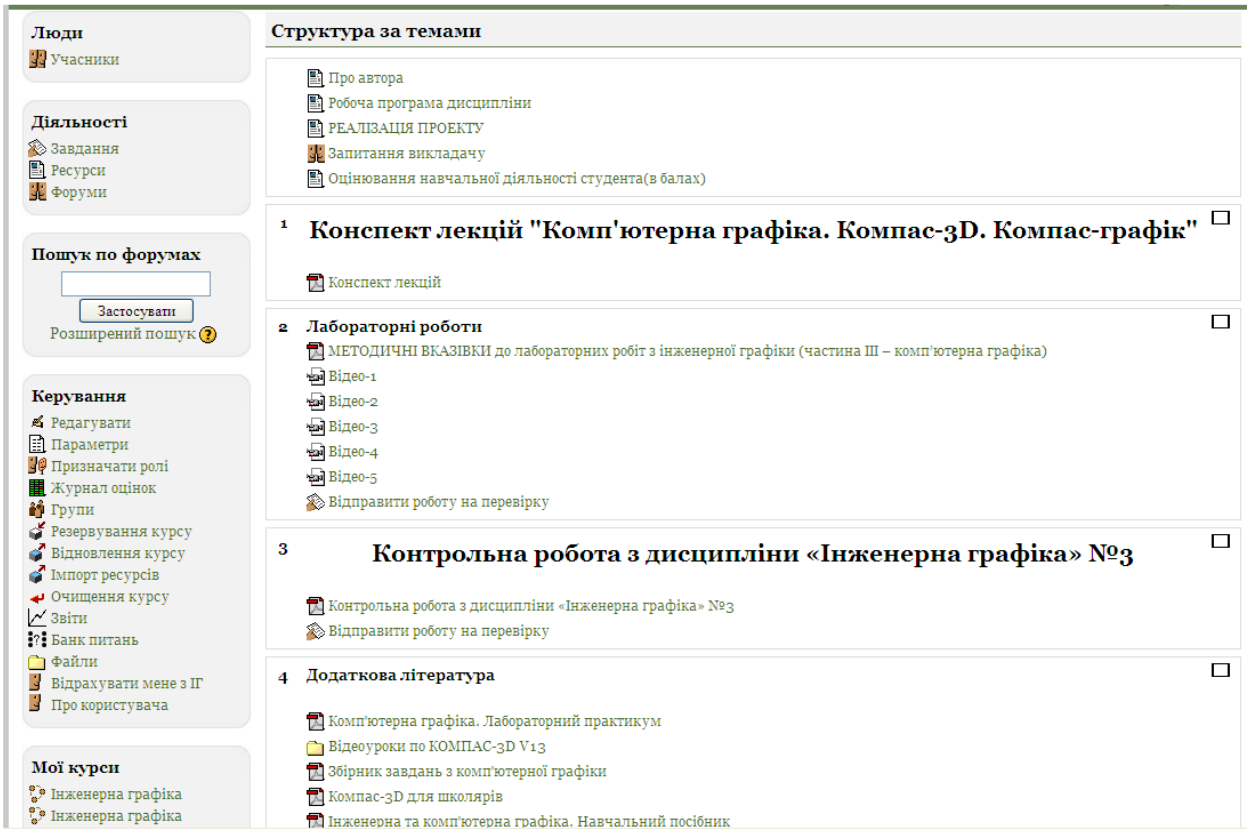


Рисунок 8 – Комп’ютерна складова курсу «Інженерна і комп’ютерна графіка»

них графічних робіт, значно спрощує процес виконання креслень, передавання їх в електронному вигляді на проміжну перевірку викладача й у зворотному напрямі, внесення викладачем зауважень безпосередньо в креслення із зазначенням конкретних місць помилкових побудов. Виправлення помилок і редагування креслень в електронному вигляді виконується з використанням спеціалізованого інструментарію використовуваного програмного продукту і без погіршення якості роботи. Для виконання такого проміжного спілкування необхідна наявність в обох сторін ідентичного чи сумісних програмних продуктів, що дозволяють проглядати креслення і вносити в них зміни без втрати даних.

Нарисна геометрія та інженерна графіка - навчальні дисципліни, одним з основних завдань яких є придбання студентами практичних навичок виконання креслень та інших документів, що входять до складу конструкторської документації традиційним способом (ручним кресленням). Якість контрольних робіт повинно регулярно оцінюватися викладачем для своєчасного коригування не тільки правильності виконання, але й відпрацьовування студентом графіки (здатності креслити), що при дистанційній формі контролю є важкоздійсненним. На увагу заслуговує питання атестаційної перевірки отриманих студентом знань. Відомо, що така перевірка проводиться у формі письмової (графічної) роботи, будь то іспит або залік. Цілком очевидно, що екзаменаційні чи залікові роботи по графічним дисциплінам, виконані дистанційно, не відображають рівень отриманих теоретичних знань і навичок креслення студента. До того ж в окремих випадках (а деколи і часто) викликає великі сумніви авторство представлених на дистанційну перевірку робіт.

Особливої уваги вимагає реалізація складової курсу «Комп’ютерна графіка» (рис. 8). Складнощі викладання комп’ютерних складових графічних дисциплін полягає у потребі їхнього комп’ютерного відтворення, специфіка подачі матеріалу полягає у необхідності візуалізації і унаочнення всіх дій викладача при та виконанні лабораторних робіт. Практика свідчить, що такі завдання є цікавими для студентів, однак їх виконання, потребує певного часу. Традиційним методичним забезпеченням таких лабораторних робіт були методичні вказівки з покроковим описом дій виконання роботи. Для проведення занять з розділу "Комп'ютерна графіка" створено електронний навчальний посібник для роботи в системі автоматизованого проектування KOMPAS.

Матеріал посібника містить теоретичні питання з основ роботи в системі KOMPAS при виконанні плоских побудов (креслень) і створення тримірних моделей, лабораторні роботи, а також варіанти завдань для виконання індивідуальних контрольних робіт. Для перевірки результатів виконання лабораторних робіт та індивідуальних контрольних завдань студент надсилає викладачеві креслення або зображення тривимірної моделі у відповідному форматі програми Компас. Дистанційний курс містить

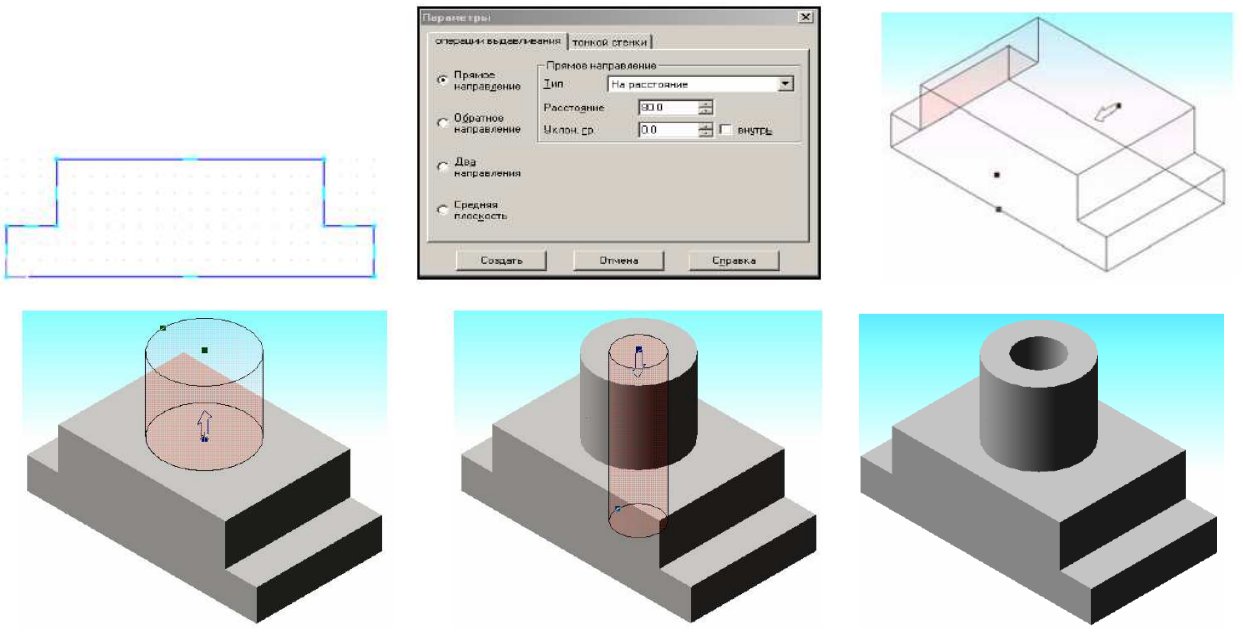


Рисунок 9 – Відеоурок на тему «Просторове моделювання у системі Компас»

посилання на безкоштовну обмежену версію даної програми KOMPAS 3D-LT-12.

Проте, у зв'язку зі складністю даних лабораторних робіт і відносну обмеженість навчальних годин, відведених на їх виконання, розроблено відеокурс з даного розділу дисципліни [9].

З метою максимального наближення методів викладання як дистанційної, так і очної форм навчання, дистанційний курс містить розроблені лабораторні роботи у вигляді відеоуроків. Відео курс складається з окремих фільмів-лабораторних робіт, кожен з них демонструє дії викладача з поясненнями та коментарями. Для створення даного курсу використовувалася програма Camtasia Studio - для створення презентацій і інтерактивних навчальних відео-уроків. З її допомогою було виконано захоплення екрану і збережено цю інформацію в відео-файл. Весь процес запису відбувається в режимі реального часу. Для максимальної зручності в програмі є можливість створення інтерактивного змісту. Саме за допомогою Camtasia Studio можна створювати інтерактивні файли довідки, проводити демонстрацію нових можливостей програм, записувати демонстраційні ролики додатків, комп'ютерних ігор тощо. Протягом заняття студенти можуть переглянути відеофільм в будь-який момент, коли у них виникають питання щодо виконання роботи. Дані відеоматеріали є вільними для копіювання студентами і можуть бути використані для самопідготовки (рисунок 9).

Таким чином, використання відеоматеріалів дає змогу використовувати більш ефективно робочий час, удосконалити і ущільнювати робочу програму та включати нові лабораторні роботи.

Висновки

На кафедрі інженерної та комп'ютерної графіки ІФНТУНГ накопичено певний досвід використання засобів дистанційної освіти для викладання дисциплін графічного циклу. Досвід використання дистанційного навчання засвідчив достатній рівень засвоєння матеріалу та високу якість знань, продемонстровану на підсумковому контролі. Отже, використання дистанційних технологій навчання в царині геометро-графічної освіти – перспективний напрям розвитку освітніх технологій навчання для майбутніх інженерів, хоча питання застосування дистанційних форм навчання вимагає індивідуального підходу до організації навчального процесу. Перспективою для подальших досліджень бачиться реалізація дистанційного навчання на старших курсах із дисциплін, які базуються на освоєнні сучасних систем автоматизованого проектування.

Література

1 Проект Національної стратегії розвитку освіти України у 2012-2021роках. – Електронний ресурс: www.mon.gov.ua/images/files/news/12/05/4455.pdf

2 Гузь Л.А. Проблеми та переваги розвитку наукових засад дистанційної освіти / Л.А. Гузь // Вісник економіки транспорту і промисловості. – 2012. – №37. – С.279-294.

3 Мокін Б.І. Основні дидактичні принципи в методиці викладання „Інженерної та комп'ютерної графіки" / Мокін Б.І., Слободянюк О.В., // Збірник матеріалів конференції „Інтернет – Освіта – Наука – 2004". Том 1. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2004. – 432 с.

4 Корнута О.В. Інноваційні аспекти впровадження дистанційної освіти при викладанні графічних дисциплін / О.В.Корнута, І.О.Бекіш, І.В.Павлик,Т.О.Пригоровська // Всеукраїнська

науково-методична конференція „Інноваційні аспекти геометро-графічної освіти”, 6-10 травня 2012 р: тези доп. – Севастополь (СевНТУ), 2012. – С.101-105.

5 Шкіца Л.Є. Застосування навчально-наочних засобів при вивченні графічних дисциплін / М.Є.Стовбенко // Теорія і методика саморозвитку педагогічної майстерності педагогів вищих технічних навчальних закладів України: Всеукраїнська науково-методична конференція, 30 травня – 1 червня 2011р.: тези доп. – Івано-Франківськ, 2011. – С. 182-184.

6 Шкіца Л.Є. Впровадження тестових технологій при вивченні нарисної геометрії, інженерної та комп’ютерної графіки / Л.Є.Шкіца, О.В.Корнута // Сучасні тенденції розвитку вищої освіти, трансформація навчального процесу у технологію навчання: Всеукраїнська науково-методична конференція, 2008 р.: тези доп. – Івано-Франківськ: ДУІКТ, 2008.

7 Шкіца Л.Є. Система дистанційного навчання як методичний засіб при вивченні дисципліни «Інженерна і комп’ютерна графіка» / Л.Є.Шкіца, О.В.Корнута, В.А.Корнута, Т.О.Пригоровська, І.О. Бекіш // Теорія і методика саморозвитку педагогічної майстерності педагогів вищих технічних навчальних закладів України: Всеукраїнська науково-методична конференція, 30 травня – 1 червня 2011 р.: тези доп. – Івано-Франківськ, 2011. – С.72-73.

8 Павлик І.В. Розробка дистанційного курсу з дисципліни «Інженерна графіка» / І.В.Павлик, О.В.Корнута // 1-й всеукраїнський науково-практичний семінар «Сучасні технології в дистанційній освіті», 7-8 травня 2012р.: тези доп. – Івано-Франківськ, 2012.– С.54-56.

9 Корнута О.В. Методика викладання «комп’ютерних» дисциплін з використанням сучасних відеозасобів / О.В. Корнута, Т.О. Пригоровська, І.О. Бекіш, В.А. Корнута // IV Всеукраїнська науково-методична конференція «Розвиток науки та освіти в освітніх закладах України в контексті Болонського процесу», 19-20 листопада 2010р.: тези доп. – Сєвєродонецьк, 2010 – С. 66.

10 Методические вопросы дистанционного обучения. графическим дисциплінам / А.М. Швайгер, В.С.Дукмасова, С.А.Печорская http://dspace.susu.ac.ru/bitstream/handle/0001.74/207/23.pdf

11 Крайнова Ольга Анатольевна. Проектирование методической системы обучения студентов дисциплине "Компьютерная графика" : 13.00.08 Крайнова, Ольга Анатольевна Проектирование методической системы обучения студентов дисциплине "Компьютерная графика" (На примере специальности 030100 "Информатика") : Дис. ... канд. пед. наук : 13.00.08 Тольятти, 2004 208 с. РГБ ОД, 61:05-13/723

Стаття надійшла до редакційної колегії 23.01.13
Рекомендована до друку І Всеукраїнською науково-методичною конференцією «Дистанційна освіта: стан і перспективи для технічних спеціальностей», яка відбулася 10-12 жовтня 2012 р.

УДК 378.11:004

ІНФОРМАЦІЙНА СИСТЕМА ДИСТАНЦІЙНОГО НАВЧАННЯ ПОЛТАВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ІМ. Ю. КОНДРАТЮКА

В.О. Онищенко, К.В. Степанов

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка,
36011, м. Полтава, Першотравневий проспект, 24;
e-mail: rector@pntu.edu.ua, dist@pntu.edu.ua

Викладено концептуальні основи створення інформаційної системи дистанційного навчання в університеті, визначено її призначення, представлені структурна та функціональна моделі системи, порядок організації інформаційної взаємодії з іншими підсистемами інформаційної інфраструктури університету, алгоритм функціонування.

Інформаційна система дистанційного навчання в університеті створюється і розгортається з метою організації роботи з удосконалення інформаційної інфраструктури університету. Система розроблена з урахуванням основних положень, стратегічних напрямів і цілей розвитку Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка, сформульованих в концепції навчання за дистанційною формою та концепції освітньої діяльності університету.

Шляхами реалізації і функціонування системи передбачено послідовне створення, введення в дію та поступовий розвиток системи дистанційного навчання в університеті, відповідно до освітніх завдань та сформульованих цілей.

Ключові слова: управління навчальним процесом, інформаційна інфраструктура.

Изложены концептуальные основы создания информационной системы дистанционного обучения в университете, определено ее предназначение, представлены структурная и функциональная модели системы, порядок организации информационного взаимодействия с другими подсистемами информационной инфраструктуры университета, алгоритм функционирования.

Информационная система дистанционного обучения в университете создается и разворачивается с целью организации работ по усовершенствованию информационной инфраструктуры университета. Система разработана с учетом основных положений, стратегических направлений и целей развития Полтавского национального технического университета имени Юрия Кондратюка, сформулированных в концепции обучения с использованием дистанционной формы и концепции образовательной деятельности университета.

Путями реализации и функционирования системы предусмотрено последовательное создание, введение в действие и постепенное развитие системы дистанционного обучения в университете, в соответствии с поставленными образовательными заданиями и целями.

Ключевые слова: управление учебным процессом, информационная инфраструктура.

Conceptual basis for creating the University information system of distance education has been presented, its aim has been determined, structural and functional models of the system have been shown, the organization order of informational interaction with other subsystems of the University information infrastructure and the functioning algorythm have been demonstrated.

The University information system of distance education is being created and developed with the purpose of organizing the work on the University information infrastructure modernization. The system has been elaborated considering basic positions, strategic directions and objectives of Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University development formulated in the concept of distance education form and the concept of University educational activity.

The ways of the system's implementation and functioning suggest successive creation, launching and gradual development of the University distance education system in accordance with the educational aims and objectives.

Key words: education process monitoring, information infrastructure.

Вступ

Впровадження системного проекту „Інформаційна система дистанційного навчання" Полтавського національного технічного університету ім. Ю.Кондратюка спрямоване на досягнення таких цілей:

– підвищення якості очної, дистанційної (заочної) освіти;

– створення умов для ефективного впровадження інновацій у підготовку, перепідготовку та підвищення кваліфікованих кадрів для національної економіки України за напрямами та спеціальностями, за якими ведеться підготовка в університеті;

– зміцнення позицій університету на ринку надання освітніх послуг в регіоні та Україні в цілому;

– зберігання, розвиток і ефективне використання науково-педагогічного потенціалу університету;

– створення прозорої системи додаткового стимулювання якісної викладацької праці та інновацій у освіті;

– розбудова середовища плідної співпраці та конкуренції у створенні якісних навчальних

матеріалів, зміцнення горизонтальних зв'язків між факультетами, кафедрами, науково-педагогічними працівниками, студентами та аспірантами споріднених вищих навчальних закладів;

– створення якісного науково-методичного, нормативно-правового, програмно-технологічного, інформаційно-лінгвістичного, матеріально-технічного та дидактичного фундаменту інноваційної освіти в університеті;

– розробка та впровадження уніфікованих технологічних рішень для забезпечення кооперації розробників навчальних матеріалів, вигідного взаємного обміну та запозичення, поєднання ресурсів для спільного досягнення цілей споріднених вищих навчальних закладів України за напрямками освітньої діяльності;

– підвищення інформаційної та корпоративної культури всіх суб'єктів освітньої діяльності університету;

– забезпечення безбар'єрного доступу до навчання для осіб з особливими освітніми потребами.

Відповідно до Програми впровадження і розвитку дистанційного навчання в Полтавському національному технічному університеті імені Юрія Кондратюка як електронного навчального середовища системи дистанційного навчання обрано MOODLE (Modular Object-Oriented Dynamic Learning Environment – Модульне об'єктно-орієнтоване динамічне середовище для навчання) і як схему освітнього процесу – дистанційна підтримка очного (заочного) навчання.

Структурна модель системи

Інформаційна система дистанційного навчання університету розглядається як інформаційна система, що об'єднує за допомогою мережевих технологій програмні і технічні засоби, організаційне, методичне забезпечення, призначене для підвищення ефективності і доступності освітнього процесу підготовки фахівців за дистанційною формою.

В процесі проектування інформаційної системи дистанційного навчання університету розглядалося ряд моделей з метою найбільш повного представлення про інформаційну систему не тільки з погляду поточних вимог і можливостей, але і перспектив розвитку.

Структурна модель інформаційної системи дистанційного навчання університету базується на організаційно-структурній схемі організації університету, у якій вона застосовується. Компоненти системи відповідають структурним підрозділам університету, що беруть участь у процесі дистанційного навчання.

На етапі впровадження системи до її складу входять: приймальна комісія, навчальний відділ, відділ кадрів, бібліотека, факультет, відповідальний за дистанційне (заочне) навчання, факультети, які використовують в навчальному процесі елементи дистанційної форми навчання, кафедри зазначених факультетів, підрозділ дистанційного навчання, центр інформаційних технологій, зовнішні (віддалені) користувачі (ти хто навчається).

Візуально ієрархію інформаційної системи дистанційного навчання можна представити у виді, що зображено на рис. 1.

В основі знаходиться рівень розробки навчальних курсів. На цьому рівні забезпечується можливість розробки дистанційних навчальних курсів на основі візуального програмування, текстових або інших редакторів, відповідно до навчальних планів та програм підготовки за визначеним напрямом (спеціальністю).

Навчальні об'єкти (дистанційні курси або їх елементи), що створені за певним стандартом, можуть бути прийнятними для використання у будь-яких стандартизованих середовищах відкритого навчання. У процесі навчання для кожного студента (навчальної групи) певного напряму (спеціальності) підготовки формується послідовність навчальних об'єктів, що відповідає навчальному плану (навчальній програмі курсу).

На другому рівні розташовуються рівень управління дистанційними навчальними курсами, який передбачає створювання каталогів дистанційних курсів, графічних, звукових, відео - і текстових файлів. Така система являє собою спеціалізовану базу даних разом із механізмами пошуку по ключових словах (метаданим), агрегування навчального контенту, документообігу, передбачає більш розширений зв'язок з іншими інформаційними системами інформаційної інфраструктури університету і т.п.

На третьому рівні знаходяться рівень управління дистанційним навчанням, на якому відбувається керування процесом навчання – реєстром користувачів і їх прав доступу, призначеним користувачам курсів, збором і збереженням інформації про дії користувачів (статистика навчання, відвідуваності, використання ресурсів, результатів тестування).

На верхньому рівні розташовуються рівень управління навчальним процесом.

Як видно з рис. 1, структурна модель інформаційної системи дистанційного навчання університету, по мірі розвитку, буде розширюватись на першому рівні (поступово і на третьому). Тому, інформаційні потоки між цими рівнями та вищими рівнями (взагалі між всіма рівнями) будуть наростати не змінюючи напрямку, змісту та взаємозв'язку цих потоків.

Функціональна модель системи

Функціональна модель інформаційної системи дистанційного навчання представляє інформаційну систему дистанційного навчання в вигляді взаємозв'язку компонентів по функціональних ознаках (адміністрування, навчання, тестування, спілкування і т.п.) (рис. 2).

Функціональна модель інформаційної системи дистанційного навчання містить:

– елементи функціональної структури інформаційної системи управління університетом (підсистеми ІС УУ);

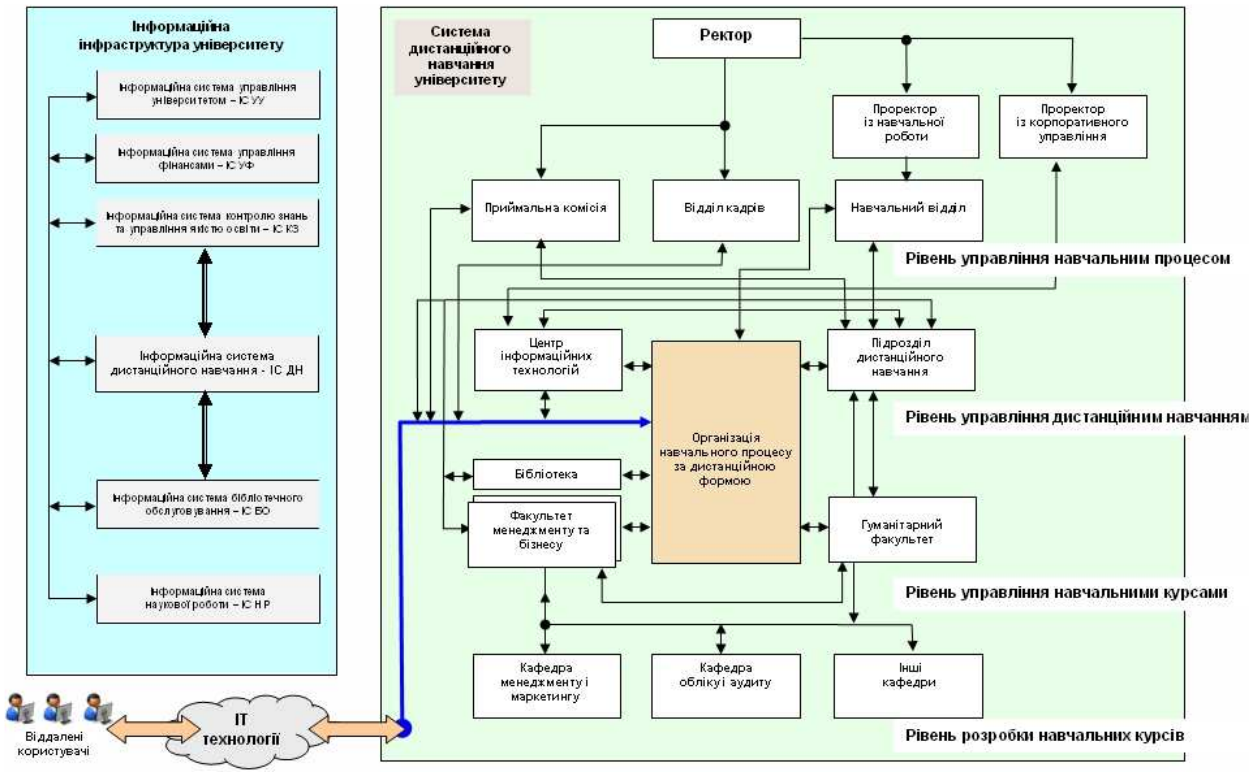


Рисунок 1 – Структурна модель інформаційної системи дистанційної освіти університету на етапі впровадження

– автоматизовані функції та/або задачі (комплекси задач);

– сукупності дій (операцій), виконуваних при реалізації автоматизованих функцій тільки технічними засобами (автоматично) або тільки людиною;

– інформаційні зв'язки між елементами та із зовнішнім середовищем з короткою вказівкою змісту повідомлень та/або сигналів, що передаються по зв'язках, і при необхідності, зв'язки інших типів (входження, підпорядкування і т. д.);

– деталізовані схеми частин функціональної структури (при необхідності).

На функціональній моделі інформаційної системи дистанційного навчання університету вказані певні категорій користувачів системи та їх можливості. По відношенню до університету всі користувачі інформаційної системи розподілені на дві великі категорії: зовнішні та внутрішні.

Зовнішні користувачі - користувачі системи, що пройшли реєстрацію та мають певні повноваження для роботи з ресурсами системи. Внутрішні користувачі - це співробітники університету, що забезпечують навчальний процес за дистанційною формою.

Зовнішні користувачі Internet можуть отримувати доступ до ресурсів системи з двома цілями:

– навчання з тієї чи іншої програми (або курсу);

– ознайомлення з матеріалами, за індивідуальним запитом.

Перша категорія - студенти, друга - читачі електронної бібліотеки університету, сторонні користувачі, тощо. Принципова різниця між ними - це наявність або відсутність контакту з викладачем, можливості проходити тестування та можливості отримання документу про освіту після завершення роботи з системою.

Внутрішні користувачі інформаційної системи дистанційного навчання університету можуть бути розподілені на основні групи залежно від функцій, що ними виконуються.

Викладач - співробітник університету, що відповідає за зміст навчально-методичних матеріалів з його дисципліни в електронній бібліотеці. Викладачі (викладачі – тьютори) відповідають на питання слухачів, пояснюють навчальні матеріали, на основі індивідуального підходу поглиблюють знання слухачів з окремих питань та перевіряють результати тестування зі свого предмету (дисципліни). Один викладач може вести кілька дисциплін.

На рівні деканату факультету здійснюється контроль організації навчального та методичного забезпечення освітнього процесу за дистанційною формою на підпорядкованих кафедрах. На цьому ж рівні готуються і обробляються обліково-звітні документи поточного, проміжного та підсумкового контролю дистанційного навчання щодо дисциплін кафедр факультету для внутрішнього аналізу та передачі необхідної інформації в підсистему Контролю знань та управління якістю освіти інформаційної системи управління університетом.

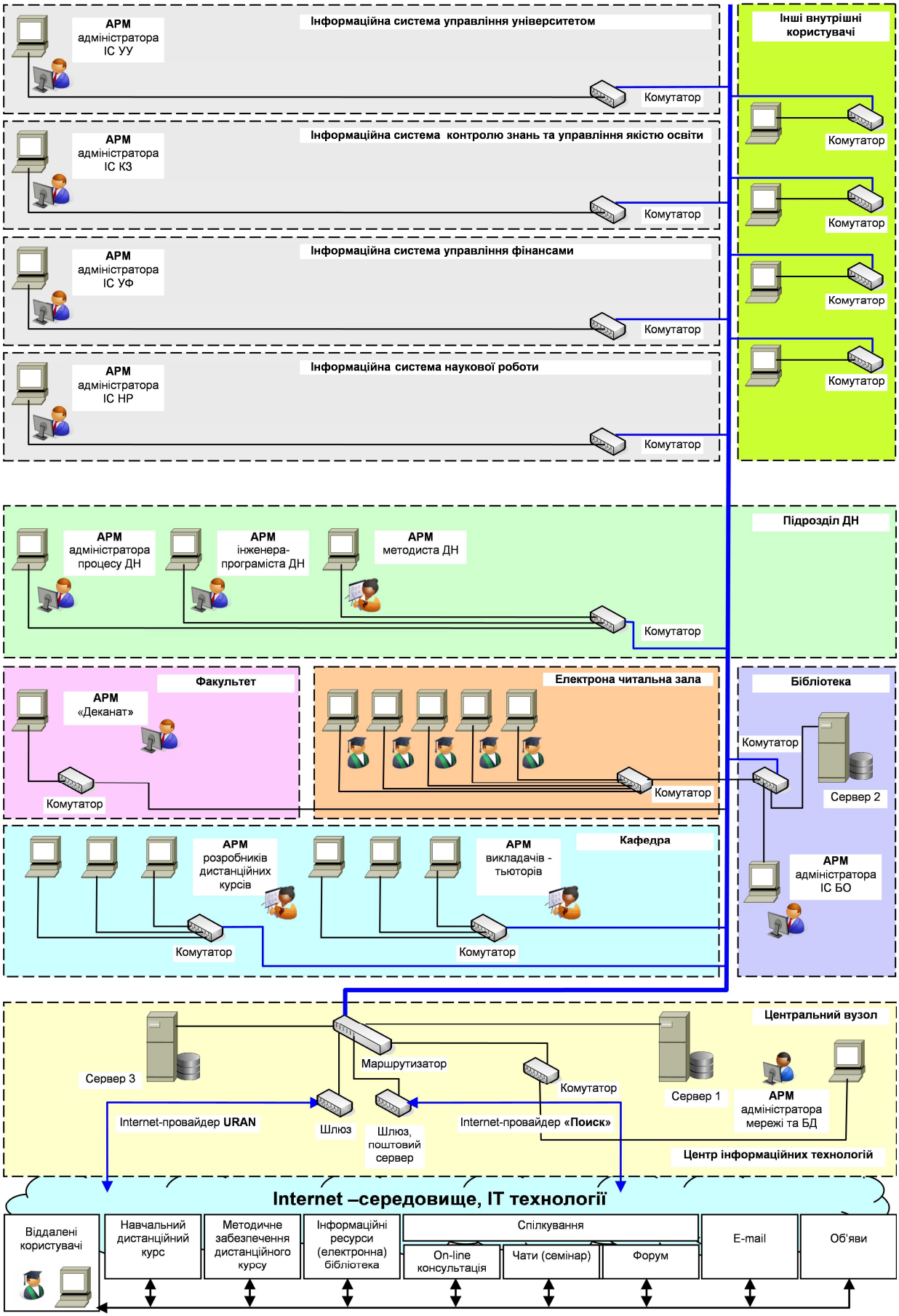


Рисунок 2 – Функціональна модель інформаційної системи дистанційної освіти університету на етапі впровадження

Адміністратор процесу дистанційного навчання – співробітник підрозділу дистанційного навчання університету, що забезпечує функції контролю за документальним оформленням навчання за дистанційною формою та регулює доступ користувачів до ресурсів системи, відповідно до визначених прав доступу. Адміністратор процесу дистанційного навчання є центральною організаційною ланкою дистанційного навчального процесу, що забезпечує взаємодію користувачів з підрозділами університету.

Адміністратор баз даних - спеціаліст з комп'ютеризації, що займається експлуатацією програмного забезпечення, програмно адмініструє систему дистанційного навчання за вказівками Адміністратора процесу дистанційного навчання та веде її моніторинг, забезпечує оновлення матеріалів в електронній бібліотеці системи, регулярно проводить резервне копіювання бази даних інформаційної системи дистанційного навчання університету та контролює безпеку системи.

Серверне обладнання інформаційної системи за своїм призначенням виконують наступні функції:

сервер 1 – доступ користувачів до Internet (проксі-сервер), файл-сервер, Web-сервер та сервер баз даних;

сервер 2 – сервер для бібліотечних нужд, сервер баз даних, файл-сервер та Web-сервер;

сервер 3 – SQL-сервер, Web-сервер, сервер електронного навчального середовища MOODLE.

Робота в інформаційній системі дистанційного навчання університету здійснюється внутрішніми користувачами з автоматизованих робочих місць, що являють собою програмно-технічні комплекси інформаційної системи, призначені для автоматизації діяльності певного виду.

Перелік функцій системи

Аналіз завдань, що стоять перед системою дистанційного навчання та її користувачами дозволяє сформулювати перелік основних функцій, які мають реалізовуватись програмним забезпеченням системи в процесі навчання: регламентація доступу користувачів до інформаційних ресурсів; контроль повноважень та структуризацію користувачів за категоріями; контроль часу дії повноважень користувачів; збір та систематизування кількох типів інформації від користувачів: результати тестування слухачів; заповнені документи з оформлення навчання; питання користувачів, отримані за каналом зворотного зв'язку; архів опрацьованої інформації, тощо. Тому основними функціями, що покладаються на інформаційну систему дистанційного навчання університету слід вважати:

– здійснення освітньої діяльності за технологіями дистанційного навчання;

– розроблення дидактичного та методичного забезпечення дистанційних курсів, а також створення цих курсів за визначеними напрямами підготовки;

– розроблення дистанційних курсів за базовими напрямами підготовки;

– апробацію та впровадження технологій дистанційного навчання у освітній процес за базовими напрямами підготовки;

– забезпечення слухачів навчально-методичними матеріалами, доступом до навчально-довідкових інформаційних ресурсів університету;

– формування та ведення каталогу інформаційних ресурсів;

– ідентифікація користувачів та їх структуризація за категоріями;

– забезпечення інтерактивного зв'язку слухача з викладачами та адміністрацією університету;

– забезпечення всіх категорій користувачів можливостями для виконання їх завдань;

– проведення тестування (вхідного, поточного, проміжного та підсумкового);

– надання максимально повної інформації про порядок навчання для потенційних користувачів;

– індивідуальний підхід до користувачів з особливими освітніми потребами щодо представлення навчального матеріалу і організації навчального процесу;

– забезпечення формування необхідних обліково-звітних документів з навчальної діяльності за дистанційною формою;

– забезпечення безпаперового документообігу із зацікавленими структурними підрозділами університету з питань навчання за дистанційною формою;

– участь у міжнародному співробітництві у сфері дистанційного навчання.

Стаття надійшла до редакційної колегії 23.01.13
Рекомендована до друку І Всеукраїнською науково-методичною конференцією «Дистанційна освіта: стан і перспективи для технічних спеціальностей», яка відбулася 10-12 жовтня 2012 р.

УДК 378.147

ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ДИСТАНЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У ВИКЛАДАННІ ІНЖЕНЕРНИХ ДИСЦИПЛІН

Я.М. Гладкий, В.В. Милько

Хмельницький національний університет, 29016, м. Хмельницький, вул. Інститутська, 11, e-mail: e n t r @ k h n u . k m . u a

Розглядаються методичні заходи при вивченні інженерних дисциплін із застосуванням інформаційних навчальних оболонок. Автори звертають увагу на сумісну роботу студентів із взаємним оцінюванням, побудову.

Ключові слова: інформаційні оболонки, технології навчання, модульне середовище для навчання.

Рассматриваются методические мероприятия при изучении инженерных дисциплин с применением информационных учебных оболочек. Авторы обращают внимание на совместную работу студентов с взаимным оцениванием, построение.

Ключевые слова: информационные оболочки, технологии обучения, модульное среду для обучения.

The article deals with methodological steps in the study of engineering disciplines through information education membranes. The authors draw attention to the work of students compatible with the mutual evaluation and construction.

Keywords: information membrane technology training, modular environment for learning.

В сучасних умовах розвитку суспільства все більшу роль відіграють інформаційні потоки. Їх об'єм, складність та концентрації за останні роки зростають мало не в геометричній прогресії. Тим складнішою стає якісна і актуальна підготовка спеціалістів інженерних спеціальностей. Адже класичні методи підготовки фахівців просто не здатні охопити всієї інформації, що напрацьовується світовою науковою спільнотою. Мова вже не йде про спеціалізацію, навіть узагальнені напрямки потребують нових методів збору, аналізу, вивчення та закріплення отриманої інформації.

Одним із засобів вирішення цієї проблеми є використання інформаційних оболонок, які інтегрують в собі багато можливостей для вивчення структурованої інформації будь-якої складності. Такі оболонки LMS (Learning Management System) отримали надзвичайно широке застосування в країнах Західної Європи, Канади, США, особливо зі стрімким зростанням заочної та дистанційної форм навчання. Проте вони не менш ефективні (а часто є незамінними) і при підготовці фахівців денної форми навчання. В цих системах повною мірою реалізуються такі принципи відкритих освітніх технологій, як: інтерактивність, загальнодоступність, можливість неодноразового використання WEB-орієнтованого навчального матеріалу. Наразі ці LMS доступні як у вигляді продуктів із відкритим кодом (Open source), так і комерційних систем. До перших відносяться: ATutor, Claroline, Dokeos, eFront, Fle3, ILIAS, KEWL.nextgen, LON-CAPA, Moodle, OLAT, Sakai Project. Комерційні LMS представлені: ANGEL Learning, Apex Learning, Blackboard Inc., Desire2Learn, eCollege, Learn.com, Meridian KSI, Saba Software, SAP Enterprise Learning, NetDimensions_EKP [1].

При всій різноманітності LMS вони, здебільшого, повинні надавати користувачу такіосновні можливості:

– керування користувачами, ролями, курсами, тьюторами, мати можливості генерування звітів;

– календар подій;

– систему повідомлень;

– різноманітні можливості тестування;

– відображення балів в різних системах оцінювання;

– можливості оцінки якості підготовлених курсів, включаючи обернений зв'язок.

Для більш розвинутих систем також характерні:

– можливість автоматичного зарахування до групи (зарахування студентів на курс згідно з обумовленими критеріями, такі як спеціальність, рік навчання тощо);

– керування зарахуванням на курси;

– інтеграція з системами відслідковування якості;

– засоби планування для визначення рівня знань та використання індивідуальних налаштувань;

– можливість групування студентів згідно з демографічними одиницями.

У Хмельницькому національному університеті як LMS використовується система модульного середовища для навчання Moodle (рис. 1) [2].

Дана система отримала надзвичайно широке розповсюдження в світовому освітньому просторі. Станом на січень 2008 року в мережі налічувалось 38896 зареєстрованих сайтів, заснованих на цій технології з 16927590 користувачами та 1713438 курсами [3].

Враховуючи ринковий попит на спеціальності економічного напрямку, дані системи дуже добре зарекомендували себе при підготовці

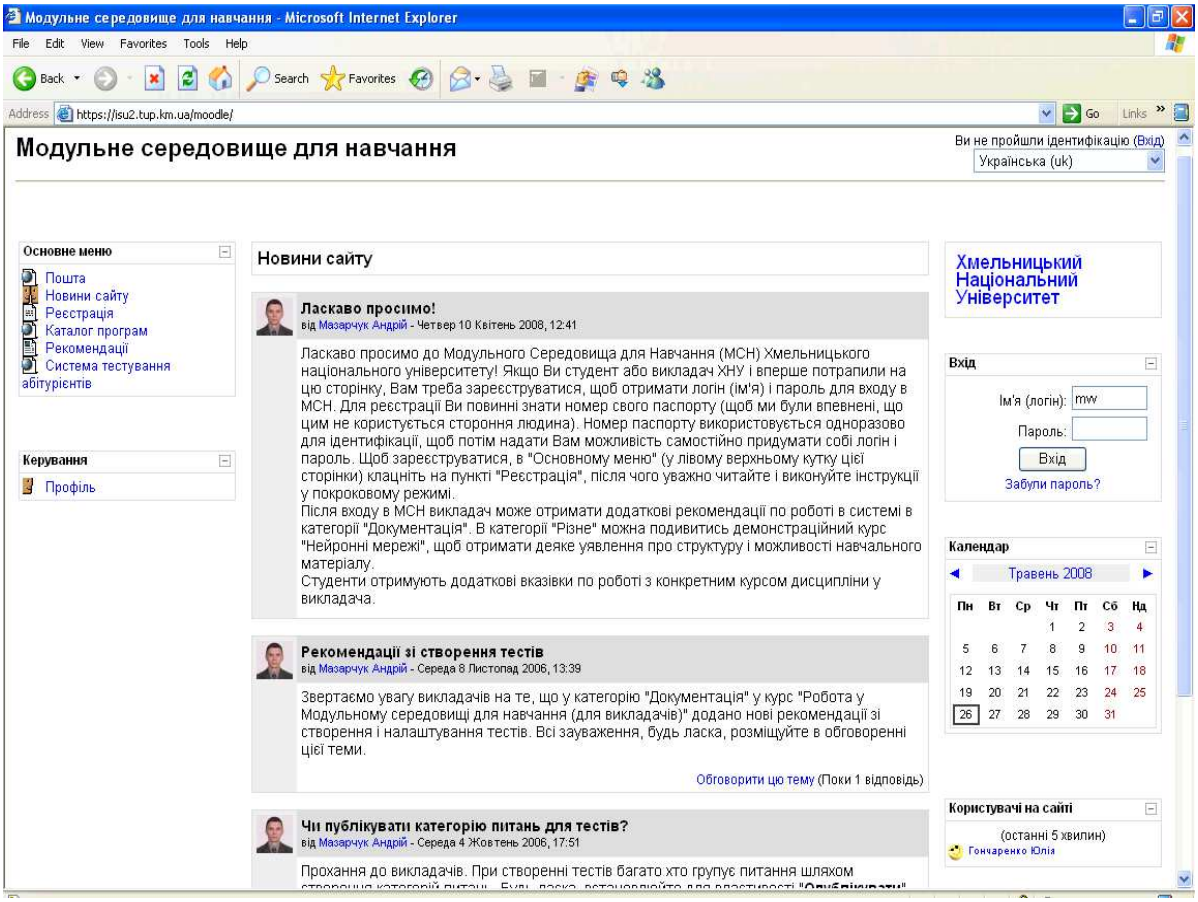


Рисунок 1 – Сторінка ідентифікації користувача модульного середовища Хмельницького національного університету

спеціалістів цього профілю. Проте застосування LMS під час навчання спеціалістів інженерних профілів, зокрема технологів, конструкторів тощо пов'язане з деякими труднощами, а саме:

– велика кількість інформації різного ступеня складності та структурованості, яка змінюється надзвичайно швидко змінюється та втрачає актуальність;

– важливість та необхідність практичної складової курсу;

– складністю віртуалізації деяких видів самостійної роботи студентів.

Окрім цього при постановці таких курсів для студентів вищезазначених спеціальностей в реаліях українського освітнього простору окрім проблем виключно інформаційного характеру доводиться вирішувати проблеми:

– належної підготовки викладачів – тьюторів;

– готовності до роботи в LMS студентів;

– розвиток інформаційних мереж в Україні загалом.

Окремо слід вказати на задачу самоконтролю тьюторів та якості підготовки курсів. Проте дана задача потребує окремого розгляду і не є предметом обговорення даної статті.

Як приклад реалізації курсу розглянемо дисципліну «Експлуатація та обслуговування машин», розроблену на кафедрі технології машинобудування ХНУ (рис. 2) [4].

Стрижнем курсу є структурована за темами програма навчання, яка займає розташована в центральній частині рис. 2 і складається з:

лекцій, конспекти лекцій (рис. 3);

лабораторних робіт (рис. 4);

практичних робіт (рис. 5);

самостійних робіт (рис. 6);

тестів для самоперевірки (рис. 7);

системи контролю та оцінювання знань (рис. 8).

Окрім цих обов'язкових елементів ефективна робота з курсом неможлива без системи повідомлень та інтерактивного спілкування із студентами, яка дозволяє ефективно скеровувати їх зусилля у потрібних напрямках вивчення дисципліни.

Додатковими можливостями є відкриті завдання із можливістю спільної роботи студентів, зокрема за допомогою Google Docs (рис. 9), а також взаємооцінювання. Такі типи завдань виводять вивчення дисципліни на новий рівень і значно підвищують зацікавленість студента у кінцевому результаті.

Слід відзначити, що модульність системи у сукупності із принципами болонської системи спонукає студента ритмічно працювати впродовж всього семестру, що особливо важливо під час підготовки фахівців інженерів машинобудівників. Таке систематичне опрацювання логічно структурованого матеріалу надзвичайно позитивно впливає насамперед чергу на пра-

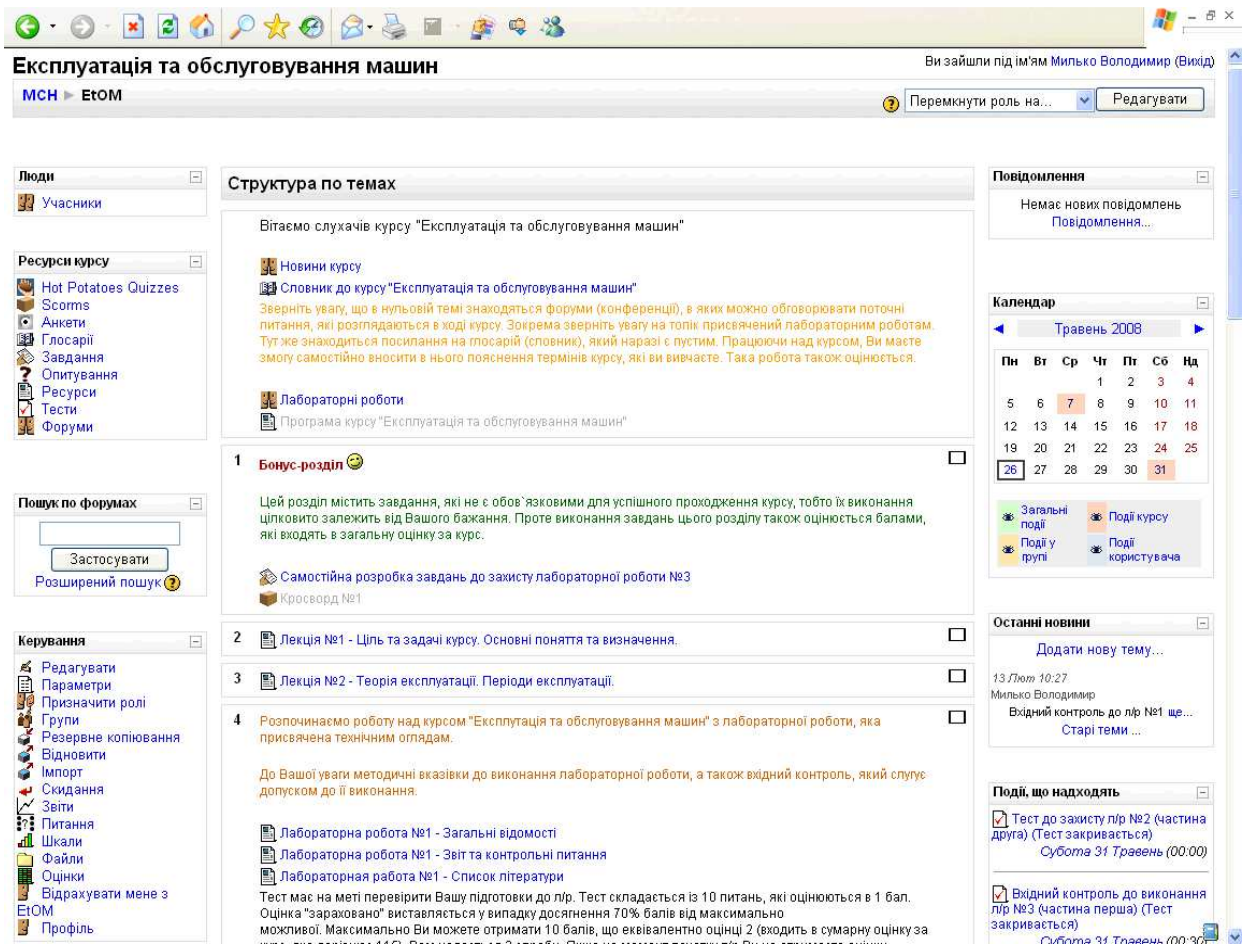
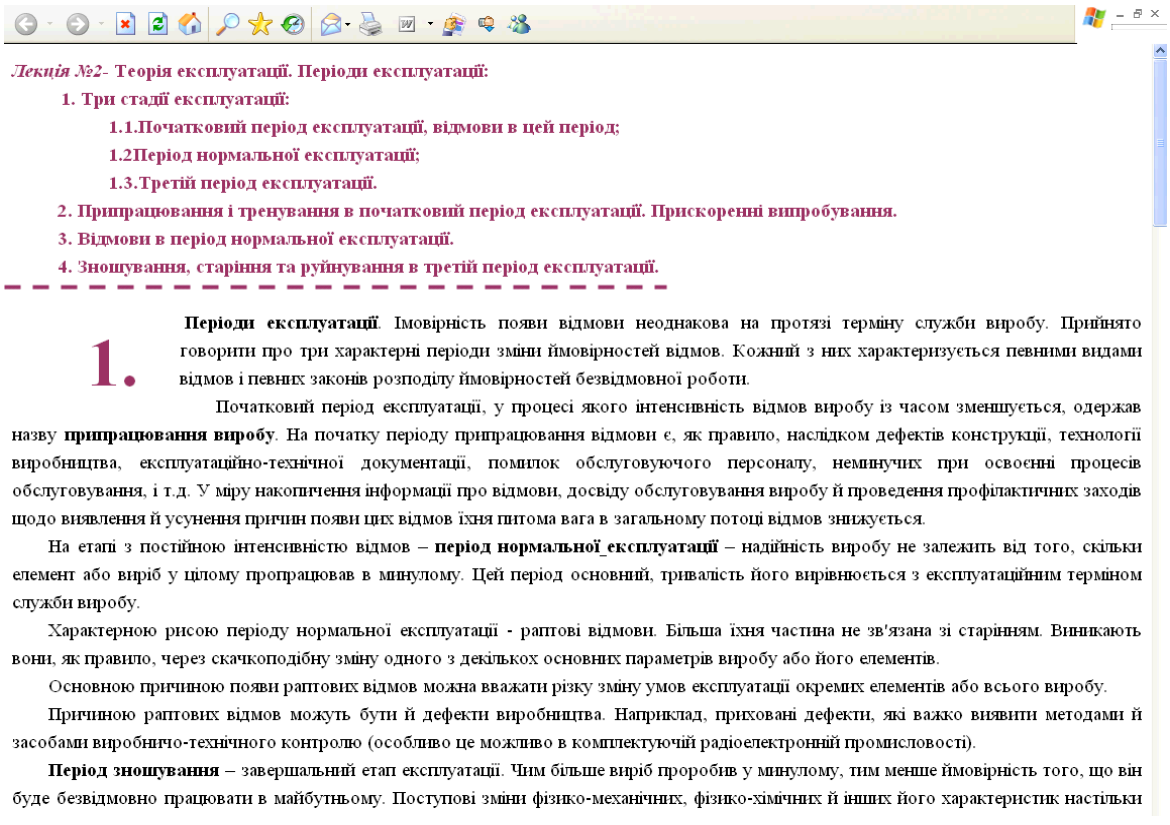


Рисунок 2 – Початкова сторінка курсу «Експлуатація та обслуговування машин»



Лекція №2- **Теорія експлуатації. Періоди експлуатації:**

1. Три стадії експлуатації:

1.1.Початковий період експлуатації, відмови в цей період;

1.2Період нормальної експлуатації;

1.3.Третій період експлуатації.

2. Припрацювання і тренування в початковий період експлуатації. Прискорені випробування.

3. Відмови в період нормальної експлуатації.

4. Зношування, старіння та руйнування в третій період експлуатації.

1. Періоди експлуатації. Імовірність появи відмови неоднакова на протязі терміну служби виробу. Прийнято говорити про три характерні періоди зміни ймовірностей відмов. Кожний з них характеризується певними видами відмов і певних законів розподілу ймовірностей безвідмовної роботи.

Початковий період експлуатації, у процесі якого інтенсивність відмов виробу із часом зменшується, одержав назву **припрацювання виробу**. На початку періоду припрацювання відмови є, як правило, наслідком дефектів конструкції, технології виробництва, експлуатаційно-технічної документації, помилок обслуговуючого персоналу, немінучих при освоєнні процесів обслуговування, і т.д. У міру накопичення інформації про відмови, досвіду обслуговування виробу й проведення профілактичних заходів щодо виявлення й усунення причин появи цих відмов їхня питома вага в загальному потоці відмов знижується.

На етапі з постійною інтенсивністю відмов – **період нормальної експлуатації** – надійність виробу не залежить від того, скільки елемент або виріб у цілому пропрацював в минулому. Цей період основний, тривалість його вирівнюється з експлуатаційним терміном служби виробу.

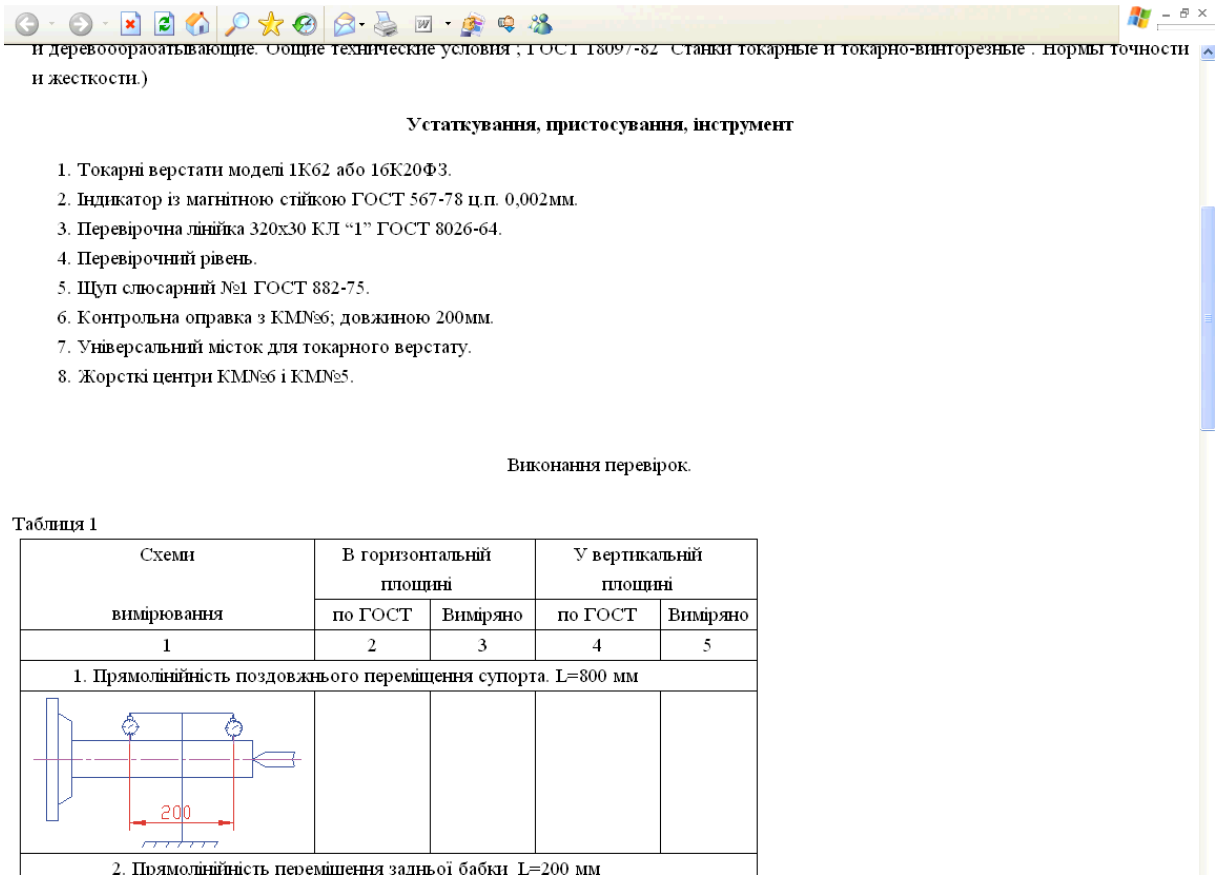
Характерною рисою періоду нормальної експлуатації - раптові відмови. Більша їхня частина не зв'язана зі старінням. Виникають вони, як правило, через скачкоподібну зміну одного з декількох основних параметрів виробу або його елементів.

Основною причиною появи раптових відмов можна вважати різку зміну умов експлуатації окремих елементів або всього виробу.

Причиною раптових відмов можуть бути й дефекти виробництва. Наприклад, приховані дефекти, які важко виявити методами й засобами виробничо-технічного контролю (особливо це можливо в комплектуючій радіоелектронній промисловості).

Період зношування – завершальний етап експлуатації. Чим більше виріб проробив у минулому, тим менше ймовірність того, що він буде безвідмовно працювати в майбутньому. Поступові зміни фізико-механічних, фізико-хімічних й інших його характеристик настільки

Рисунок 3 – Вигляд вікна із матеріалом лекційного курсу



и деревообрабатывающие. Общие технические условия ; ГОСТ 18097-82 "Станки токарные и токарно-винторезные . Нормы точности и жесткости.)

Устаткування, пристосування, інструмент

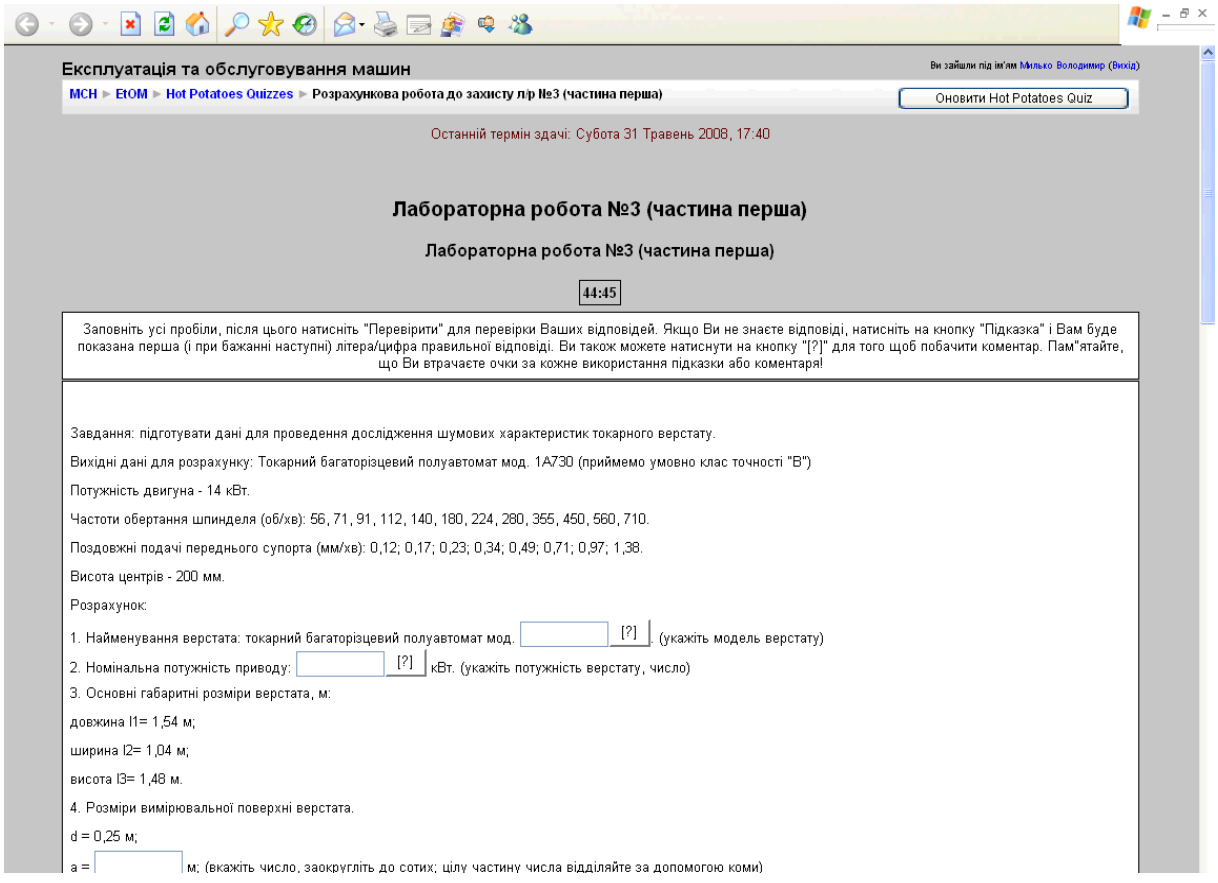
1. Токарні верстати моделі 1К62 або 16К20Ф3.
2. Індикатор із магнітною стійкою ГОСТ 567-78 ц.п. 0,002мм.
3. Перевірочна лінійка 320х30 КЛ "1" ГОСТ 8026-64.
4. Перевірочний рівень.
5. Щуп слюсарний №1 ГОСТ 882-75.
6. Контрольна оправка з КМ№6; довжиною 200мм.
7. Універсальний місток для токарного верстату.
8. Жорсткі центри КМ№6 і КМ№5.

Виконання перевірок.

Таблиця 1

Схеми вимірювання	В горизонтальній площині		У вертикальній площині	
	по ГОСТ	Виміряно	по ГОСТ	Виміряно
1	2	3	4	5
1. Прямолінійність поздовжнього переміщення супорта. L=800 мм				
2. Прямолінійність переміщення задньої бабки L=200 мм				

Рисунок 4 – Вигляд вікна із лабораторною роботою



Експлуатація та обслуговування машин

Ви зайшли під ім'ям Милько Володимир (Вихід)

МСН ► ЕтОМ ► Hot Potatoes Quizzes ► Розрахункова робота до захисту л/р №3 (частина перша)

Оновити Hot Potatoes Quiz

Останній термін здачі: Субота 31 Травень 2008, 17:40

Лабораторна робота №3 (частина перша)

Лабораторна робота №3 (частина перша)

44:45

Заповніть усі пробіли, після цього натисніть "Перевірити" для перевірки Ваших відповідей. Якщо Ви не знаєте відповіді, натисніть на кнопку "Підказка" і Вам буде показана перша (і при бажанні наступні) літера/цифра правильної відповіді. Ви також можете натиснути на кнопку "[?]" для того щоб побачити коментар. Пам"ятайте, що Ви втрачаєте очки за кожне використання підказки або коментаря!

Завдання: підготувати дані для проведення дослідження шумових характеристик токарного верстату.

Вихідні дані для розрахунку: Токарний багаторізцевий полуавтомат мод. 1А730 (приймемо умовно клас точності "В")

Потужність двигуна - 14 кВт.

Частоти обертання шпинделя (об/хв): 56, 71, 91, 112, 140, 180, 224, 280, 355, 450, 560, 710.

Поздовжні подачі переднього супорта (мм/хв): 0,12; 0,17; 0,23; 0,34; 0,49; 0,71; 0,97; 1,38.

Висота центрів - 200 мм.

Розрахунок:

1. Найменування верстата: токарний багаторізцевий полуавтомат мод. [?] (укажіть модель верстату)
2. Номінальна потужність приводу: [?] кВт. (укажіть потужність верстату, число)
3. Основні габаритні розміри верстата, м:

довжина l1= 1,54 м;

ширина l2= 1,04 м;

висота l3= 1,48 м.

4. Розміри вимірювальної поверхні верстата.

d = 0,25 м;

a = м; (вкажіть число, заокругліть до сотих; цілу частину числа відділяйте за допомогою коми)

Рисунок 5 – Вигляд вікна із розрахунково-практичною роботою

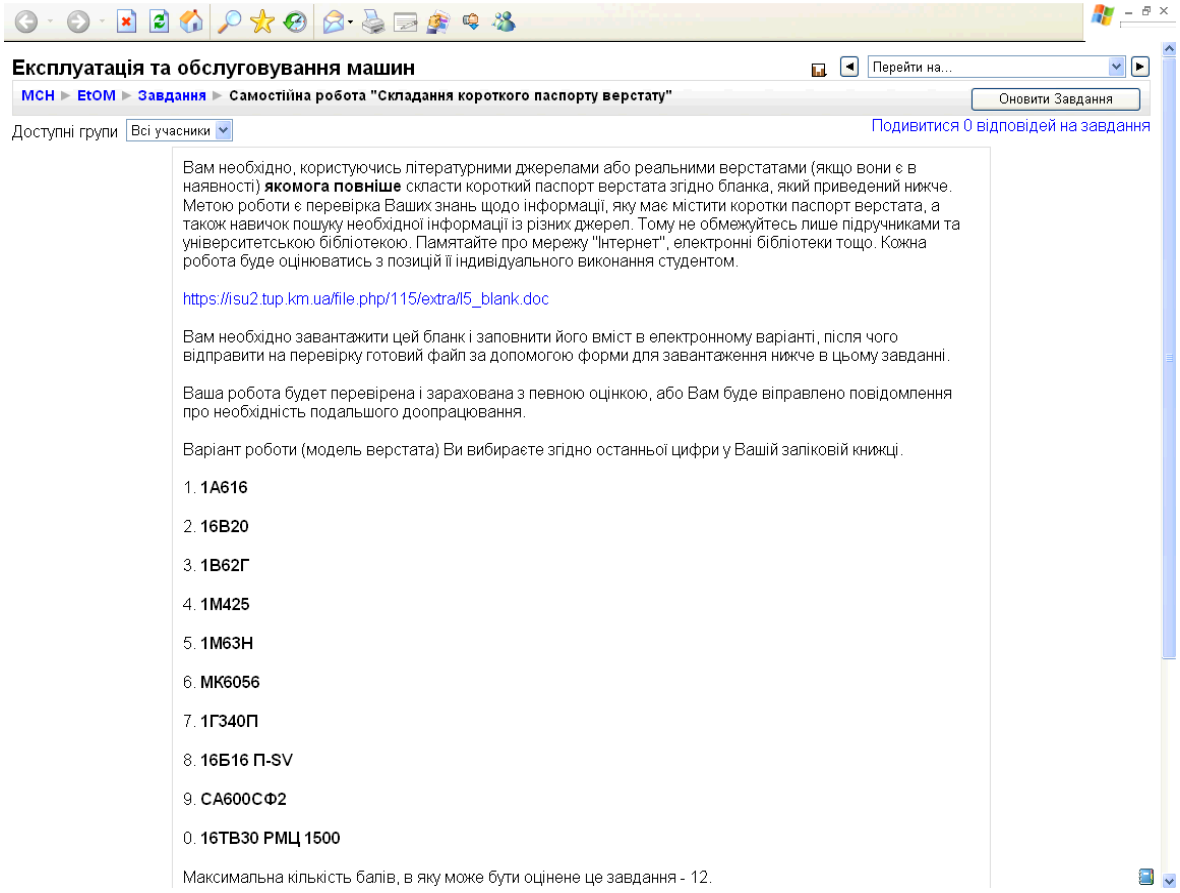


Рисунок 6 – Вигляд вікна із самостійною роботою студента

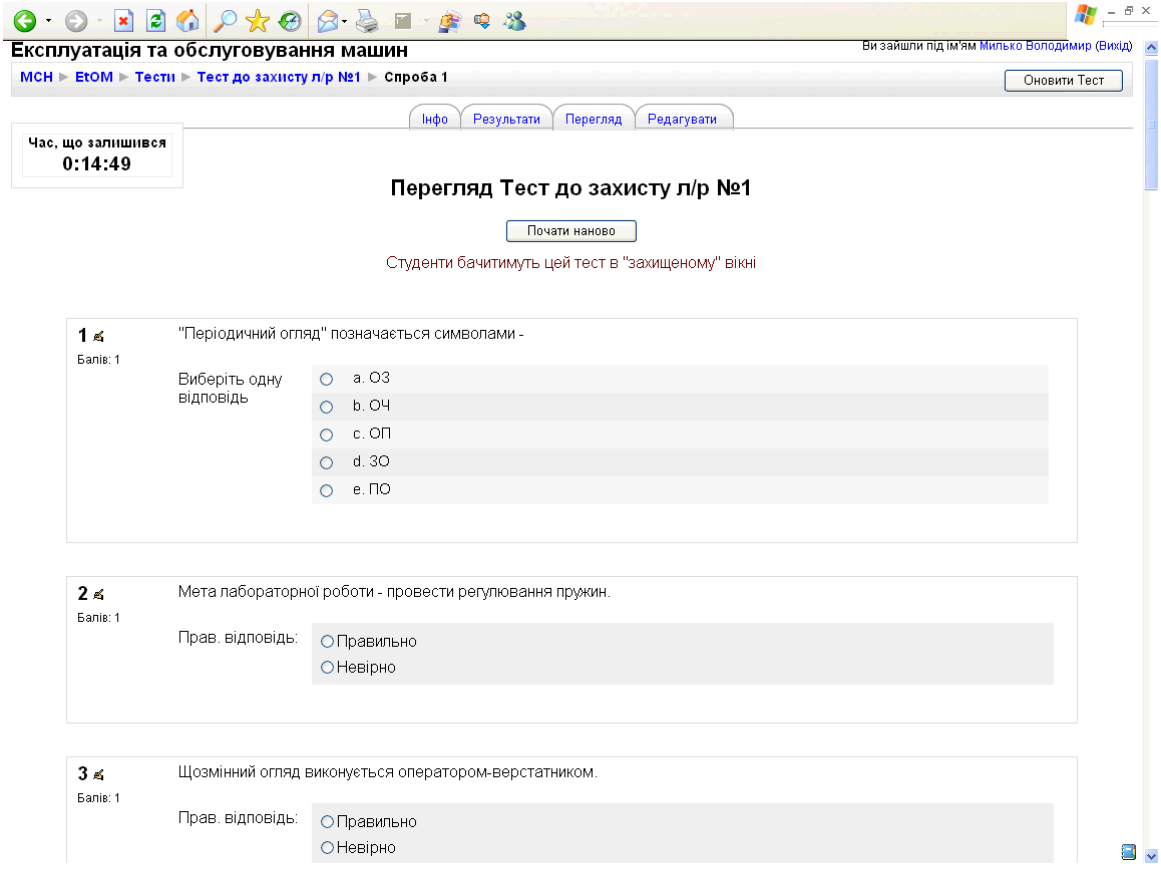


Рисунок 7 – Приклад системи тестування

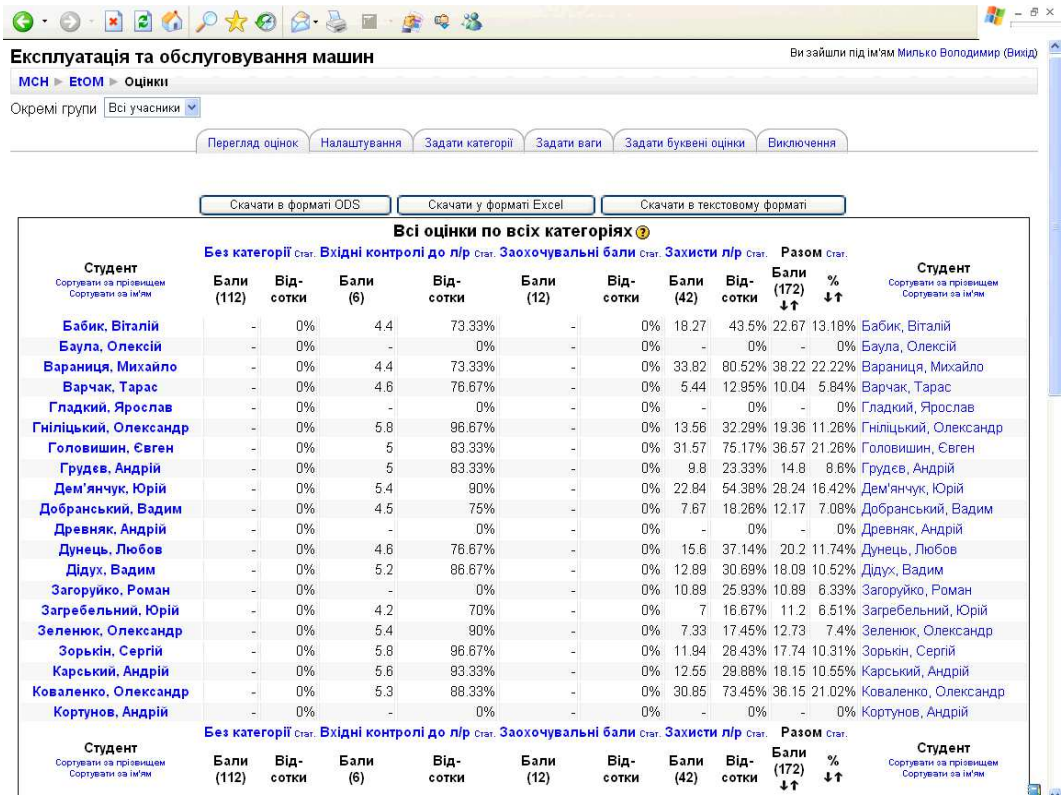


Рисунок 8 – Вигляд вікна контролю та оцінювання знань студенів

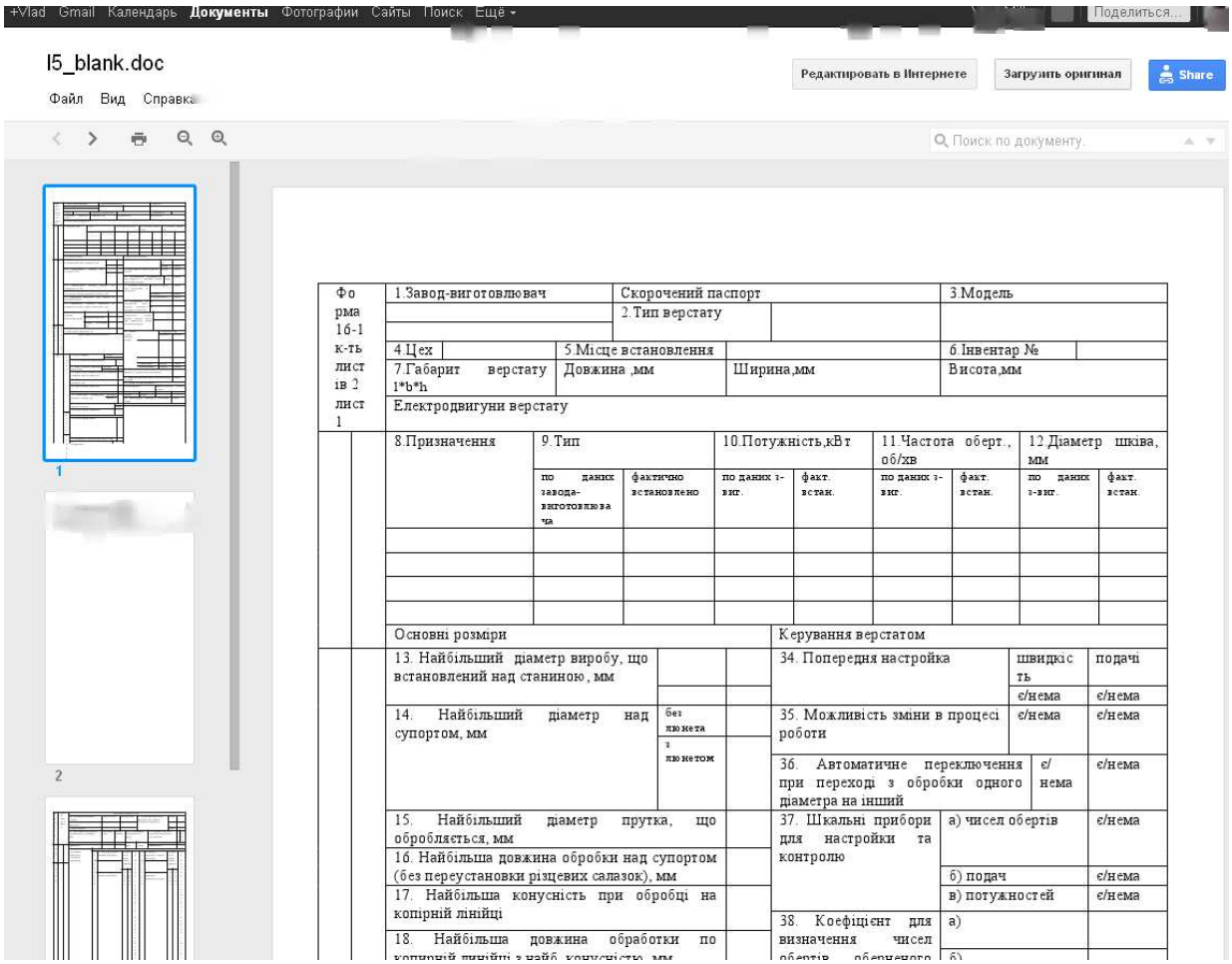


Рисунок 9 – Використання Google Docs для спільної роботи над завданням

вильне формування у студента навичок оволодіння великими обсягами технічної інформації, принципам її аналізу та узагальнення.

Досвід використання LMS системи модульного середовища для навчання Moodle в ХНУ показав її краще пристосування для внутрішньої освітньо-інформаційної мережі, коли забезпечується інтерактивна взаємодія на рівні студент – навчальний курс – викладач. У випадку функціонування LMS на рівні спеціальностей виникає проблема керування навчальним процесом з боку адміністративних служб ВУЗу та об'єднання всього навчального процесу в єдину освітню мережу.

Одержаний досвід ХНУ свідчить про значну перспективність такої форми навчання, особливо для тих категорій населення, які раніше за різними обмеженнями не могли навчатися ні на очній, ні на заочній формах навчання.

Література

1.http://en.wikipedia.org/wiki/Learning_Management_System.
2.http://moodle.org.
3.http://en.wikipedia.org/wiki/Moodle.
4.https://isu2.tup.km.ua/course/view.php?id=115

Стаття надійшла до редакційної колегії 23.01.13
Рекомендована до друку І Всеукраїнською науково-методичною конференцією «Дистанційна освіта: стан і перспективи для технічних спеціальностей», яка відбулася 10-12 жовтня 2012 р.

УДК 378.14

ВІРТУАЛЬНІ ІНТЕРАКТИВНІ НАВЧАЛЬНІ ЗАСОБИ – МАЙБУТНЄ ДИСТАНЦІЙНОГО НАВЧАННЯ ДЛЯ ІНЖЕНЕРНИХ НАПРЯМІВ

М.П. Мазур, М.Л. Яновський

Хмельницький національний університет, 29016, м. Хмельницький, вул. Інститутська, 11, e-mail: entr@khnu.km.ua

Розглядаються особливості розробляння віртуальних практичних інтерактивних засобів навчальних дисциплін для дистанційного навчання з технічних і технологічних спеціальностей. Автори пропонують власну методику розробляння таких засобів навчальних дисциплін у вигляді віртуальних симуляційних або відео-лабораторних робіт.

Ключові слова: дистанційне навчання, віртуальні лабораторні роботи, віртуальні лабораторні роботи.

Рассматриваются особенности разработки виртуальных практических интерактивных средств учебных дисциплин для дистанционного обучения. Авторы предлагают собственную методику разработки таких средств учебных дисциплин в виде виртуальных симуляционных или видео-лабораторных работ.

Ключевые слова: дистанционное обучение, виртуальные лабораторные работы, виртуальные лабораторные работы.

The features of the development of interactive virtual practical training courses for distance learning are examined in the article. The authors suggest their own technique of development of such tools concerning certain disciplines as virtual simulation or video labs.

Keywords: distance learning, virtual labs, virtual lab works.

Постановка проблеми. Серед потенційних абітурієнтів сьогодні спостерігається зростання популярності дистанційного навчання (ДН), що є оптимальним способом реалізації навчального процесу, де студент має постійний доступ до навчальних матеріалів та можливість спілкування із викладачами не тільки очно, а й on-line і of-line за допомогою Internet, не полишаючи основної професійної діяльності і за своїм місцем проживання. З огляду на це, провідні університети країни вважають за необхідне розвивати в себе ДН, як одну з актуальних і перспективних інформаційних технологій у сучасній освіті, звертаючи особливу увагу на збереження якості освіти. [1]. Багаторічний досвід діяльності ХНУ в галузі ДН свідчить про те, що цей критерій складніше забезпечити при впровадженні ДН для технічних і технологічних спеціальностей [3], де практична складова є однією із важливих частин професійних програм підготовки студентів. Як правило, вона реалізується за допомогою лабораторних (ЛЗ), практичних (семінарських) занять тощо.

Наказом МОН України №40 від 21.01.2004 [4] передбачається, що ЛЗ може проводитись **очно** у спеціально обладнаних навчальних лабораторіях; **дистанційно** з використанням відповідних моделювальних програм (емуляторів), тренажерів, віртуальних лабораторій, тощо тобто віртуальних практичних засобів навчання (ВПЗН); або за **змішаною схемою**. Такими ВПЗН можуть бути: електронний (віртуальний) тренажер, електронний лабораторний практикум, віртуальний лабораторний практикум, автоматизований лабораторний практикум, автоматизований лабораторний практикум з віддаленим доступом.

Формулювання цілей статті (постановка завдання). У статті пропонується технологія створення віртуальних інтерактивних лабораторних робіт для дистанційного навчання.

Виклад основного матеріалу. Для початку дамо визначення звичайної і віртуальної лабораторної роботи (ВЛР).

Лабораторна робота – форма навчального заняття, під час якого студент під керівництвом викладача особисто проводить натурні або імітаційні експерименти чи досліди з метою підтвердження окремих теоретичних положень навчальної дисципліни, набуває практичних навичок роботи з лабораторним устаткуванням, обладнанням, обчислювальною технікою, вимірювальною апаратурою, методикою експериментальних досліджень у конкретній предметній галузі.

Існують найрізноманітніші точки зору на те, що саме можна вважати ВЛР і як найбільш ефективно застосовувати ВЛР в навчальному процесі. На нашу думку, ВЛР повинна насамперед забезпечувати моделювання досліджуваних об'єктів загалом і бути математичною моделлю об'єкта, що адекватно реагує на зовнішні впливи - команди, що подаються студентом. Можна запропонувати таке визначення ВЛР: віртуальна лабораторна робота - інформаційна система, що інтерактивно моделює реальний технічний об'єкт і його істотні для вивчення властивості із застосуванням засобів комп'ютерної візуалізації [2].

Наші дослідження свідчать, що впровадження технологій створення віртуальних інтерактивних лабораторних робіт у навчальний процес проходити за двома напрямками:

– ВЛР створюється на основі стимуляційної програми, що повністю відтворює процес і

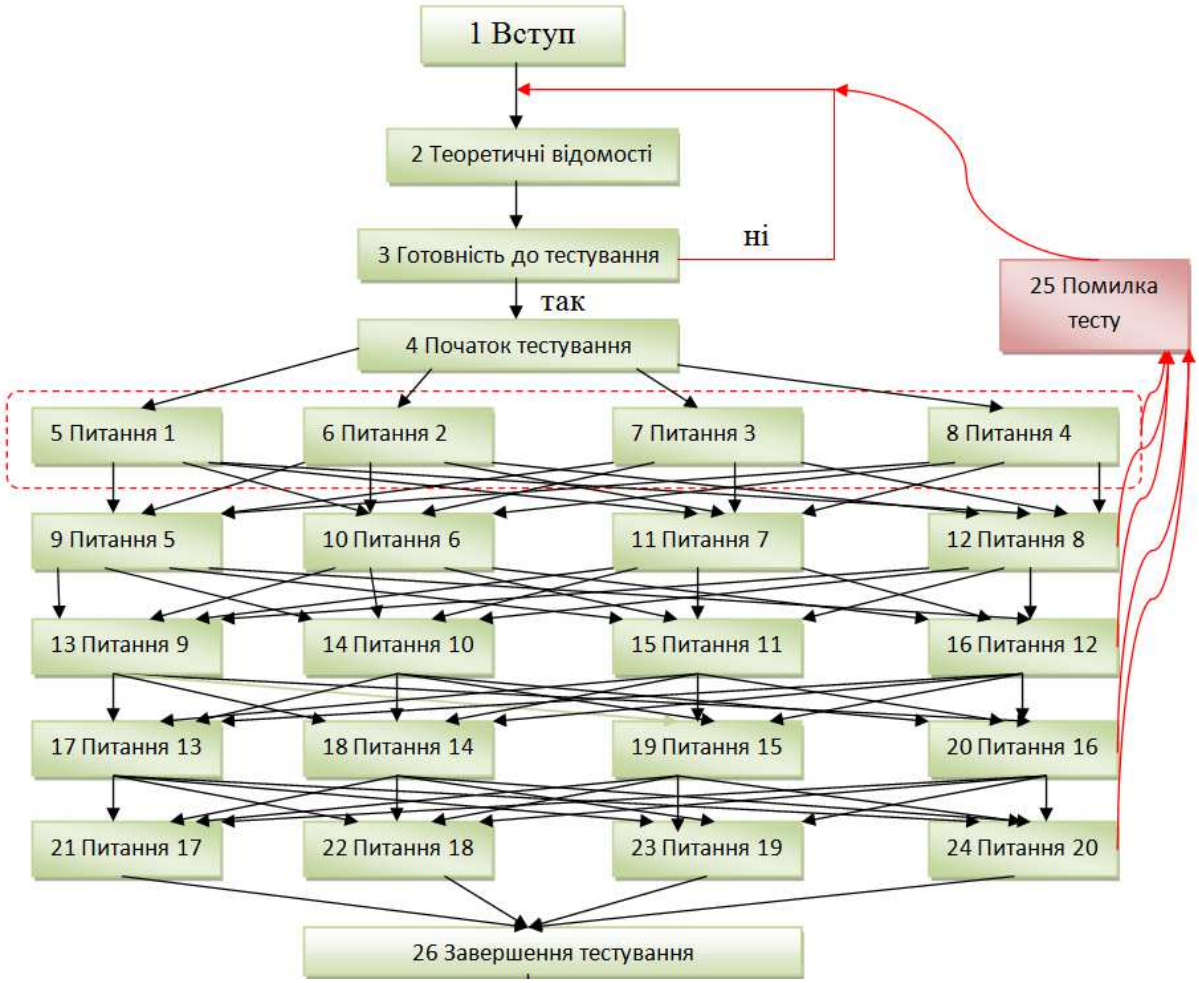


Рисунок 1 – Фрагмент блок-схеми «Тестування»

послідовність його функціонування. Така програма може візуалізувати навіть ті процеси, які в реальних приладах чи установках є невидимі або є надто швидкими**;**

– ВЛР проводиться на реальних, найсучасніших установках і пристроях, які часто відсутні в лабораторіях ВНЗ. Завдання комп'ютерної програми у такому випадку – створити ефект присутності студента біля реального приладу чи установки в ході виконання роботи.

Причому обидва ці варіанти виконання мають бути саме типовими, щоб кожна ЛР створювалась за єдиною технологією, а не була унікальним творінням одного чи групи викладачів.

Спираючись на результати дослідження та практичної розробки ХНУ було визнано доцільним, що ВЛР (або ВПЗН) дистанційного курсу повинна мати у своїй структурі такі частини:

1) Назву дисципліни та ВЛР, мету використання ВЛР, відомості про автора(ів) та їх фото, рекомендації студенту, рекомендовану літературу, методичні рекомендації і завдання для виконання ВЛР;

2) Вхідний контроль (тестові питання для контролю, метою яких є перевірка готовності і допуск студента до роботи із ВЛР);

3) Методичні рекомендації і завдання для виконання ВЛР;

4) Блок віртуальних інтерактивних ситуаційних елементів виконання етапів ВЛР;

5) Висновки, завдання і рекомендації до оформлення звіту з роботи із ВЛР.

Робота починається із розробки сценарію лабораторної роботи у вигляді блок-схеми, фрагменти якої зображені на рисунках 1 і 2.

На **другому етапі**, спираючись на вже існуючу блок-схему, проводиться заповнення шаблонів необхідним навчальним матеріалом (рис. 3, 4, 5).

Якщо студент невірно виконав наступний крок лабораторної роботи, то він отримує (як варіант) наступне повідомлення (рис. 6).

Після закінчення заповнення шаблону та підготовки відеофрагментів (зйомка, «нарізання» відеофрагментів та їх озвучення) підготовленні матеріали здаються у встановленому вигляді ВЕБ-дизайнеру для складання у ВЛР (рис. 7).

Кінцевим результатом є інтегрована у дистанційний курс і готова до використання у дистанційному навчанні ВЛР, фрагмент якої показано на рис. 8.

Робота може бути згенерована і використовуватись самостійно у вигляді окремого файлу, а також може вбудовуватись у загальну програму вивчення дистанційного курсу, розміщаючись після вивчення тих розділів, практичні



Рисунок 2 – Фрагмент блок-схеми, що показує інтерактивне розгалуження при проведенні ВЛР

Навчальний модуль	272 Техноекологія (Промислова екологія)
Тема	Вивчення іонообмінного способу очищення стічних вод
Автор	Міронова Н.Г.

Иллюстраци	№ шага	1	Время	1
	Текст пояснения			
	Вступ. Шановний студенте, перед початком виконання лабораторної роботи Вам необхідно ознайомитись із теоретичними відомостями та пройти допуск (тестовий контроль). У разі не проходження тестового контролю Вам потрібно повторно ознайомитись із теоретичним матеріалом та отримати допуск. Після виконання лабораторної роботи Вам необхідно оформити згідно заданої форми звіт та відправити його викладачу. Бажаємо успіхів у виконанні роботи.			
Рисунок к действию	Текст вариантов действия		Номер	
			2	

Иллюстраци	№ шага	2	Время	1
272-1.1.doc	Текст пояснения			
	Теоретичні відомості.			
Рисунок к действию	Текст вариантов действия		Номер	
			3	

Рисунок 3 – Фрагмент шаблону «Вступ»

Иллюстраци	№ шага	7	Время	1
	Текст пояснения			
	Глинисті мінерали (алюмосилікати), польові шпати, фельдшпатоїди, слюди, оксиди, фосфати і силікати металів (титану, кальцію, цирконію та ін.), рудні мінерали змінного складу представляють собою			

Рисунок к действию	Текст вариантов действия	Номер
	неорганічні природні іоніти	9, 10, 11, 12
	органічні природні іоніти	25
	неорганічні синтетичні іоніти	25

Рисунок 4 – Фрагмент шаблону для етапу «Тестування»

Иллюстраци	№ шага	44	Время	
272-03-044.wmv	Текст пояснения			
	Вимірювання оптичної густини 4-го розчину. Наливаємо в кювету 4-ий розчин. Вставляємо її в гніздо. Переводимо ручку з положення «вліво» в положення «вправо» і визначаємо оптичну густину по шкалі, звертаючи увагу на ціну поділки. Визначення проводиться тричі. Після вимірювання розчин виливають. Кювету промивають спочатку дистильованою водою, а потім наступним розчином, який буде вимірюватись. Оптична густина 4-го розчину дорівнює (виберіть значення, що відповідає зображенню).			

Рисунок к действию	Текст вариантов действия	Номер
	$D_4 = 0,33$	45
	$D_4 = 0,255$	65

Рисунок 5 – Фрагмент шаблону, що описує елемент інтерактивності під час проведення ВЛР

Иллюстраци	№ шага	66	Время	
	Текст пояснения			
	Помилка тесту виконання лабораторної роботи. На жаль, Ви обрали неправильний варіант відповіді. Вам необхідно повторити цей крок лабораторної роботи.			

Рисунок к действию	Текст вариантов действия	Номер
		45

Рисунок 6 – Шаблон, в якому вказується результат помилкової дії студента

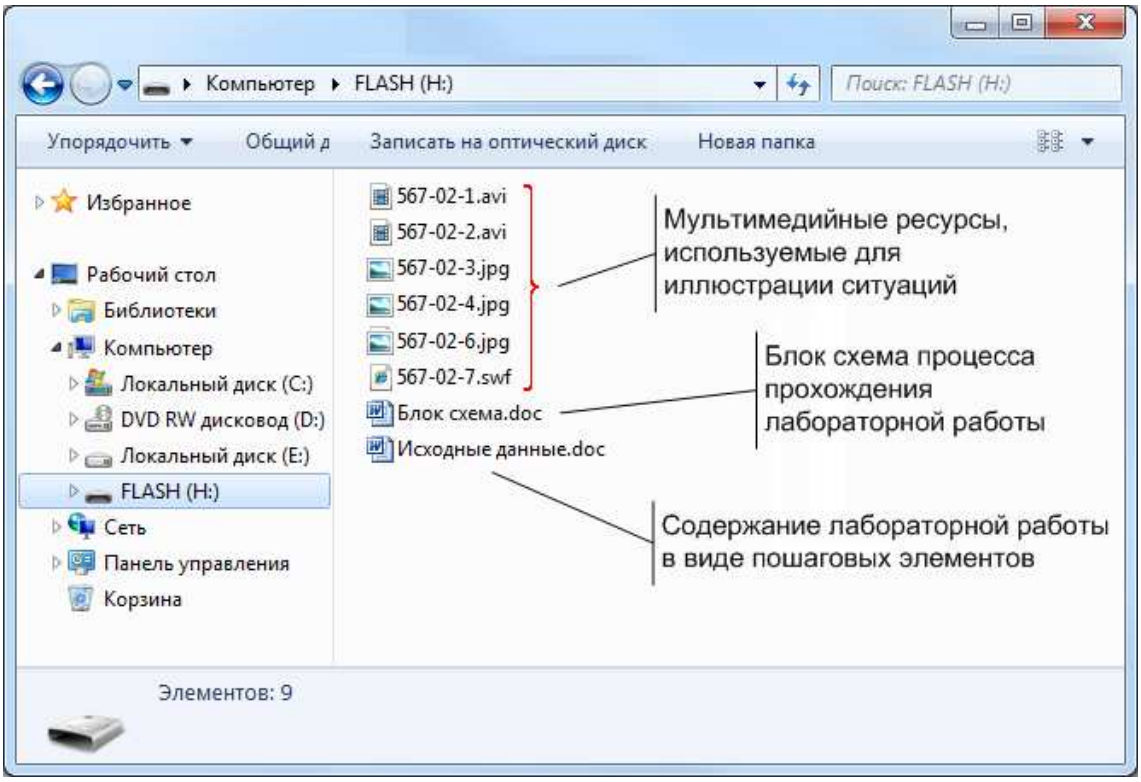


Рисунок 7 – Приклад відповідно оформлених матеріалів для складання ВЛР

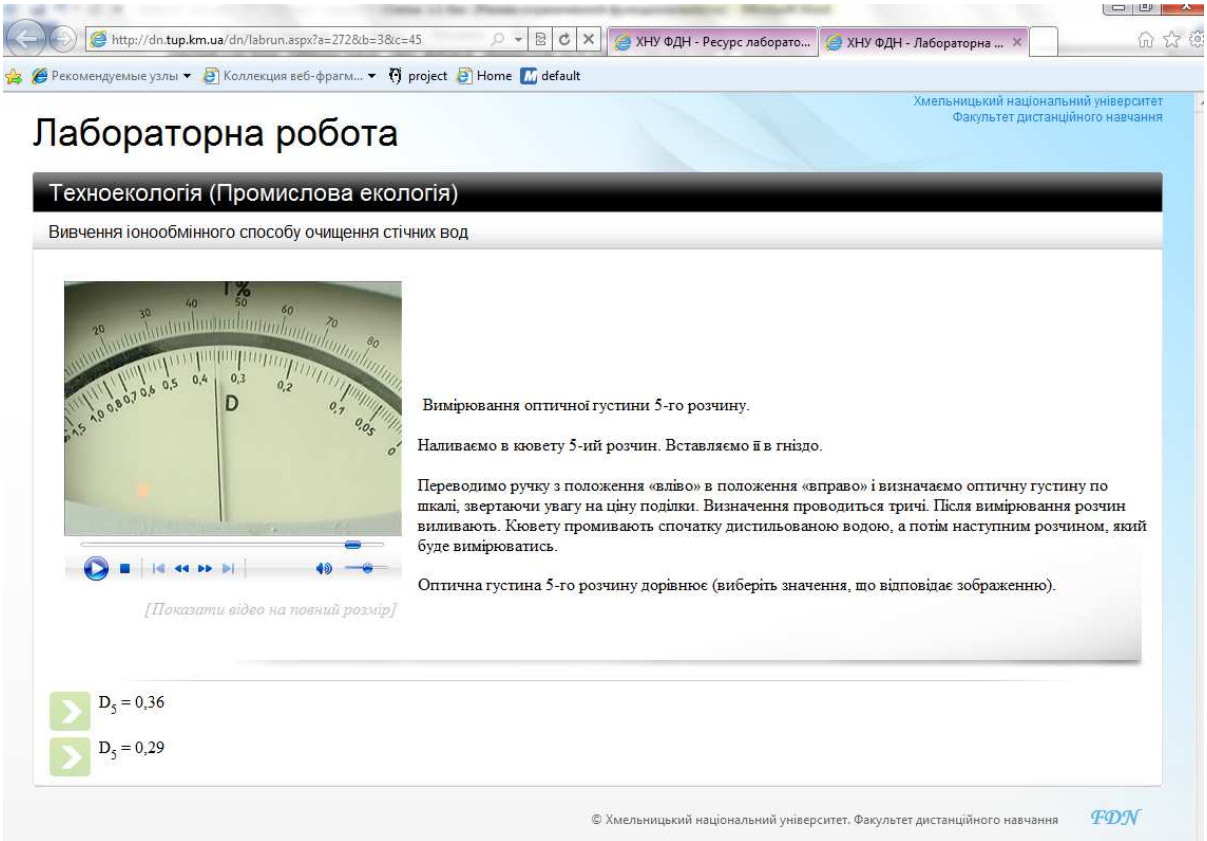


Рисунок 8 – Фрагмент ВЛР «Вивчення іонообмінного способу очищення стічних вод»

навички до яких мають бути створені і закріплені ВЛР.

Висновки. Застосування розробленої методики розробки віртуальних практичних інтерактивних засобів навчальних дисциплін для дистанційного навчання дає змогу вирішити проблему впровадження інформаційних дистанційних технологій у навчально-виховних процес ВНЗ з технічних і технологічних напрямів і спеціальностей підготовки.

Література

1 Технология создания виртуального лабораторного практикума в информационно-образовательной среде. / Г.П. Путилов, И.А. Тарасов, С.Р. Тумковский. – Режим доступу: http://learning.itsoft.ru/docs/ptt.html.

2 Троицкий Д. И., Виртуальные лабораторные работы в инженерном образовании. – Режим доступу: http://www.quality-journal.ru/data/article/375/files/Binder13.pdf.

3 Сокуренко В.І. Особливості впровадження дистанційного навчання для технічних спеціальностей / Сокуренко В. І., Огданський І. Ф., Папірник Р. Б., Солод Л. В. – Режим доступу: http://www.nbuv.gov.ua/portal/natural/Vpabia/2009_2/statii/UDK%20378.pdf.

4 Положення про дистанційне навчання // Офіційний сайт Українського інституту інформаційних технологій в освіті: http://udec.ntu-kpi.kiev.ua.

Стаття надійшла до редакційної колегії 23.01.13
Рекомендована до друку І Всеукраїнською науково-методичною конференцією «Дистанційна освіта: стан і перспективи для технічних спеціальностей», яка відбулася 10-12 жовтня 2012 р.

УДК 378.4.147:62

ДОСВІД ВИКОРИСТАННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ДИСТАНЦІЙНОГО НАВЧАННЯ ПІД ЧАС ВИКЛАДАННЯ НАВЧАЛЬНИХ ДИСЦИПЛІН ТЕХНІЧНОГО НАПРЯМУ

І.О. Іваницька, К.В. Степанов

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка,
36011, м. Полтава, Першотравневий проспект, 24,
e-mail: rector@pntu.edu.ua, dist@pntu.edu.ua

Висвітлюється питання застосування елементів дистанційної форми навчання під час викладанні дисципліни технічного напряму „Взаємозамінність, стандартизація та технічні вимірювання" студентам денної форми навчання 3 курсу напряму підготовки 6.070106 „Автомобільний транспорт" на кафедрі технології машинобудування електромеханічного факультету університету.

Застосування елементів дистанційної форми навчання відбувалось в рамках проведення в університеті експерименту „Впровадження педагогічних інновацій у формах і методах навчання та виховання, пов'язаних з технологіями дистанційного навчання".

Проілюстровано приклади елементів дистанційного курсу навчальної дисципліни, наведено порівняльні дані результатів підсумкового контролю ступеня опанування студентами експериментальної групи матеріалом курсу навчальної дисципліни „Взаємозамінність, стандартизація та технічні вимірювання".

Ключові слова: електронне навчання, лабораторний практикум, дистанційний навчальний курс.

Освещается вопрос применения элементов дистанционной формы обучения при преподавании дисциплины технического направления „Взаимозаменяемость, стандартизация и технические измерения" студентам дневной формы обучения 3 курса направления подготовки 6.070106 „Автомобильный транспорт" на кафедре технологии машиностроения электромеханического факультета университета.

Применение элементов дистанционной формы обучения происходило в рамках проведения в университете эксперимента „Внедрение педагогических инноваций в формах и методах обучения и воспитания, связанных с технологиями дистанционного обучения".

Проиллюстрированы примеры элементов дистанционного курса учебной дисциплины, приведены сравнительные данные результатов итогового контроля степени овладения студентами экспериментальной группы материалом курса учебной дисциплины „Взаимозаменяемость, стандартизация и технические измерения".

Ключевые слова: электронное обучение, лабораторный практикум, дистанционный учебный курс.

The article deals with the issue of applying the distance education elements in teaching the technical subject "Interchangeability, standardization and technical measurements" to the full-time third-year students of speciality "Automobile Transport" at the Machine Building Technology Department (Electro-Engineering Faculty of the University).

The distance education elements have been applied within the framework of the University experiment "Pedagogical innovations implementing in the forms and methods of distance technologies education".

The models of distance course subjects elements have been illustrated, comparative data have displayed the summative assessment results for determining the experimental group students' level of mastering the subject "Interchangeability, standardization and technical measurements".

Key words: e-learning, laboratory practical work, distance learning course.

Впровадження дистанційного навчання як форми організації навчально-виховного процесу у вищих навчальних закладах суттєво впливає на зміст, організаційні форми і методи навчання та управління навчально-виховним процесом, а також спричинює істотні зміни в діяльності студентів, науково-педагогічних працівників, керівників вищих навчальних закладів.

Широке впровадження засобів інформаційно-комунікаційних технологій у навчальний процес за дистанційною формою його організації створює додаткові можливості для розроблення та впровадження нових, особистісне орієнтованих освітніх технологій, диференціації навчального процесу для якомога повного використання здібностей студентів, задоволення їх освітніх запитів і потреб, розкриття творчого потенціалу.

Використання засобів інформаційно-комунікаційних технологій як засобів навчальної та комунікативної діяльності в системі дистанційного навчання сприяє формуванню інформаційної культури студентів та науково-педагогічних працівників, що стає сьогодні невід'ємною складовою загальної культури кожної людини і суспільства загалом, впливає на особистісні психічні та психофізіологічні особистісні якості суб'єктів навчальної діяльності.

Система дистанційної освіти університету – це інформаційна система, що об'єднує за допомогою мережевих технологій програмні й технічні засоби, організаційне, навчальне і методичне забезпечення, призначене для підвищення ефективності та доступності освітнього

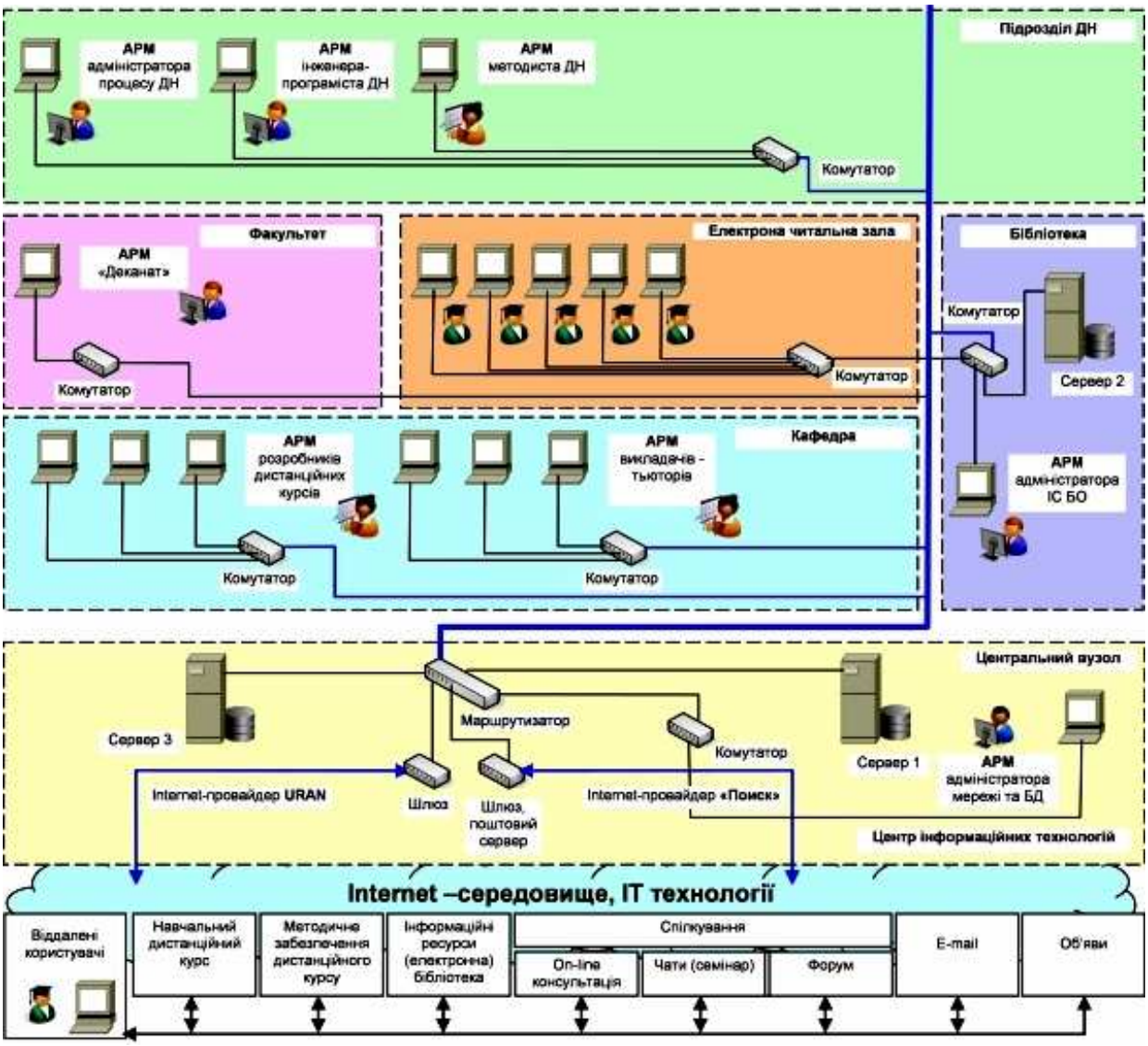


Рисунок 1 – Функціональна модель системи дистанційної освіти в університеті

процесу підготовки фахівців за дистанційною формою. Як електронне навчальне середовище системи дистанційного навчання університету обрано Moodle (Modular Object-Oriented Dynamic Learning Environment – Модульне об'єктно-орієнтоване динамічне середовище навчання) і як схему освітнього процесу – дистанційну підтримку денного (заочного) навчання. Функціональна модель системи дистанційної освіти в університеті зображена на рис. 1.

В рамках Програми та плану-графіку впровадження і розвитку дистанційного навчання в Полтавському національному технічному університеті імені Юрія Кондратюка проведено два етапи експерименту „Впровадження педагогічних інновацій у формах і методах навчання та виховання, пов'язаних з технологіями дистанційного навчання".

Завданнями дослідження експерименту є:

– визначення кількісних та якісних закономірностей результатів навчальної діяльності чисельно неоднорідного контингенту студентів в реальних умовах навчання за допомогою технологій дистанційного навчання;

– апробація викладання навчальних дисциплін гуманітарного напряму „Управлінський облік" та технічного напряму „Взаємозамінність, стандартизація та технічні вимірювання" з використанням елементів технології дистанційного навчання;

– ступінь опанування за допомогою технологій дистанційного навчання матеріалів курсів зазначених навчальних дисциплін студентами експериментальних груп;

– відпрацювання пропозицій щодо удосконалення методичного, навчального, наукового, кадрового, програмно-технічного забезпечення системи дистанційного навчання університету.

Всі завдання дослідження обох етапів експерименту було виконано. Підсумки проведення першого етапу експерименту було обговорено на засіданні ректорату. В зв'язку з тим, що загальний висновок за результатами першого етапу виявився позитивним, під час проведення другого етапу експерименту, рішенням керівництва університету було визначено викладання в шостому семестрі (друге півріччя 2010/2011 навчального року) навчальної дис-

ципліни технічного напрямку „Взаємозамінність, стандартизація та технічні вимірювання” із застосуванням елементів технології дистанційної навчання.

Для участі в експерименті були залучені студенти двох груп: експериментальна та контрольна. Обидві групи 3 курсу навчалися за навчальним планом напряму підготовки 6.070106 „Автомобільний транспорт” денної форми навчання. Експеримент проводився на навчально-матеріальній базі кафедри технології машинобудування електромеханічного факультету університету.

Відповідно до програми експерименту на підготовчому етапі було проведено анкетування тих, хто навчається з метою з’ясування наступних питань:

– ступінь забезпеченості студентів особистою комп’ютерною технікою;

– можливість підключення до мережі Internet за місцем постійного проживання студентів;

– які операційні системи та пакети прикладних і спеціалізованих програмних продуктів встановлені на комп’ютерах користувачів;

– види та версії браузерів які використовують користувачі для перегляду ресурсів Internet;

– наявність реальних електронних поштових скриньок у користувачів.

Студентам було запропоновано зробити самооцінку своїх навичок, як користувачів комп’ютерної техніки.

В результаті обробки анкетних даних з’ясу-валося, що майже всі студенти забезпечені комп’ютерною технікою та можливістю підключення до мережі Internet за місцем постійного проживання. Наявні пакети програмних продуктів, які встановлені на комп’ютерній техніці студентів, дозволяють працювати із запропонованим дистанційним курсом. Деякі спеціалізовані програмні продукти із ліцензією „freeware” було запропоновано скопіювати з ресурсу дистанційного курсу. Переважна більшість студентів оцінила себе як користувачів „середнього” рівня, лише одиниці, як „початкового”.

При розробці дистанційного курсу „Взаємозамінність, стандартизація та технічні вимірювання” було доповнено та перероблено навчально-методичний матеріал щодо забезпечення викладання зазначеної дисципліни. Лекційний курс зазнав суттєвих доповнень та виправлень в зв’язку із виходом нових ДСТУ. Внесені корективи до завдань та методичних рекомендацій до курсової роботи з дисципліни. Практично заново складено Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт та Журнал до виконання лабораторних робіт із курсу „Взаємозамінність, стандартизація та технічні вимірювання” для студентів механічних спеціальностей. Практично всі матеріали доповнено сучасними ілюстраціями а розділи дистанційного курсу – відео фрагментами навчальних та науково-популярних фільмів з тематики, що вивчається. Широко використовується посилання на відкриті ресурси документального телесеріалу How it’s made? (Як це зроблено?) каналу Discovery Channel.

З метою недопущення складнощів з організацією навчального процесу, в зв’язку з тим, що до експерименту залучалися студенти денної форми навчання структура дистанційного курсу із зазначеної дисципліни виконана в форматі календаря з потижневим розміщенням навчального матеріалу. Календарне проходження дистанційного курсу було прив'язано до реального розкладу занять.

Навчальний процес по вивченню перших трьох тем навчальної дисципліни відбувався в спеціалізованому комп’ютерному класі під контролем представника підрозділу дистанційної освіти. Подальше опанування матеріалів дистанційного курсу студенти здійснювали самостійно із допомогою технологій дистанційного навчання.

Під час розроблення дистанційного курсу серйозні проблеми виникли щодо сценарію практичної частини лабораторного курсу навчальної дисципліни. Для вирішення цих проблем було прийнято рішення лабораторний практикум забезпечити наступним чином:

– під керівництвом науково-педагогічних працівників кафедри технології машинобудування за участю студентів експериментальної групи було знято на цифрову відеокамеру хід виконання лабораторної роботи із закадровим поясненням процесу виконання, відзнятий відеоматеріал розміщено у відповідних ресурсах дистанційного курсу;

– методичні рекомендації щодо виконання лабораторних робіт було доповнено варіантами реальних вимірів, отриманих при виконанні робіт в кількості, що перевищує чисельність навчальної групи за списком;

– за наявністю, матеріали лабораторних робіт ілюструвалися відео фрагментами із відкритих Internet-джерел;

– теоретичний матеріал доповнено ілюстративною частиною – фотозображеннями лабораторного устаткування або окремих етапів виконання лабораторних робіт;

– було використано широке посилання на довідковий матеріал, тексти ДСТУ.

Реальний обсяг навчально-методичного за безпечення однієї із лабораторних робіт зображено на рис. 2. Рисунок доповнено кадром навчального відео, відзнятого під час виконання лабораторної роботи.

Приклади фрагментів варіантів вимірів та показань приладів до лабораторних робіт „Штангенінструменти” та „Визначення шорсткості поверхні” наведено на рис. 3.

Під час проведення експерименту кількісні та якісні закономірності результатів навчальної діяльності студентів проводились за результатами семестрового контролю. Розглядалися результати складання семестрових екзаменів з навчальних дисциплін „Взаємозамінність, стандартизація та технічні вимірювання” та „Деталі машин”. Обидві групи, і експериментальна, і контрольна вивчали навчальну дисципліну „Деталі машин” в умовах стаціонару, під ке-

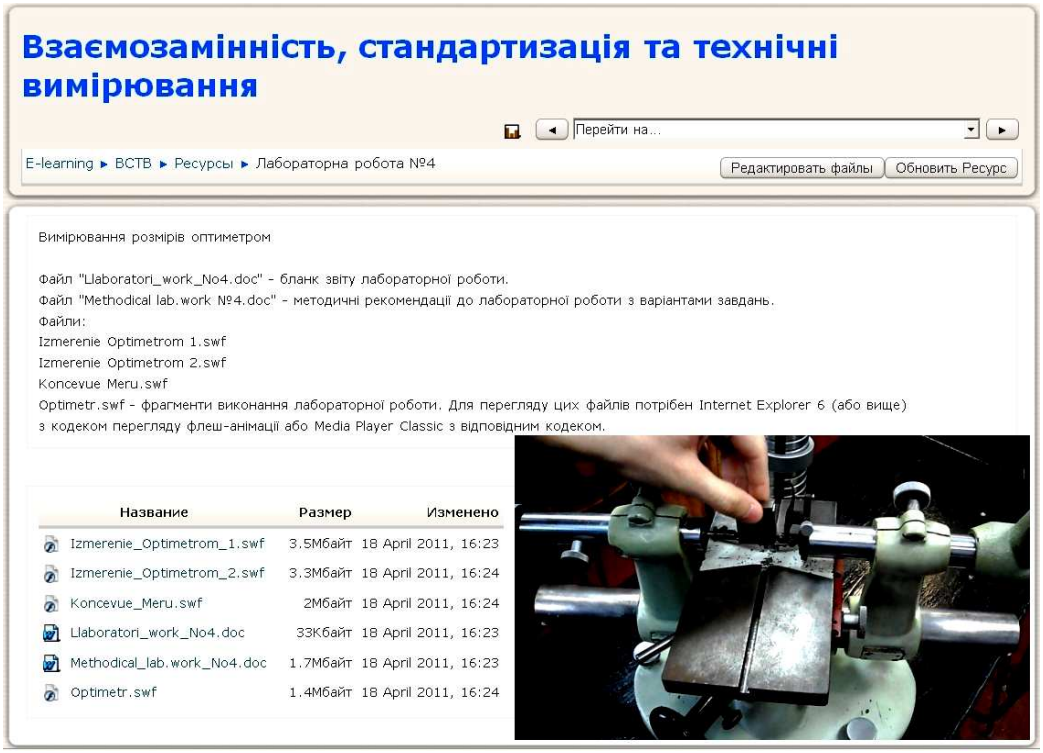


Рисунок 2 – Наповнення навчального ресурсу лабораторної роботи №4

Таблиця 1.3. Результати вимірів циліндричної деталі.

№№ варіантів	Перетини, перпендикулярні до осі деталі	Розмір у напрямку вимірювання 1	2	№№ варіантів	Перетини, перпендикулярні до осі деталі	Розмір у напрямку вимірювання 1	2	№№ варіантів	Перетини, перпендикулярні до осі деталі	Розмір у напрямку вимірювання 1	2
1	1	12,00	12,00	8	1	125,05	125,00	15	1	120,05	120,00
	2	12,05	12,00		2	125,10	125,10		2	119,95	119,95
	3	12,00	12,00		3	125,00	125,00		3	120,05	120,05
	1	7,95	7,95		1	15,85	15,80		1	12,00	12,00
	2	7,90	7,90		2	15,75	15,75		2	12,05	12,00
	3	7,95	7,95		3	15,70	15,70		3	12,00	12,00
	1	24,00	24,05		1	54,00	54,05		1	27,85	27,80
	2	23,95	23,95		2	53,95	53,90		2	27,75	27,75
	3	23,90	23,90		3	54,05	54,00		3	27,70	27,70
2	1	125,05	125,00	9	1						
	2	125,10	125,10		2						
	3	125,00	125,00		3						
	1	16,10	16,15		1						
	2	16,00	16,00		2						
	3	15,95	15,95		3						
	1	120,05	120,00		1						
	2	119,95	119,95		2						
	3	120,05	120,05		3						
3	1	50,15	50,20	10	1						
	2	50,10	50,10		2						
	3	50,05	50,05		3						
	1	127,00	127,05		1						
	2	127,10	127,10		2						
	3	127,05	127,00		3						
	1	54,00	54,05		1						
	2	53,95	53,90		2						
	3	54,05	54,00		3						

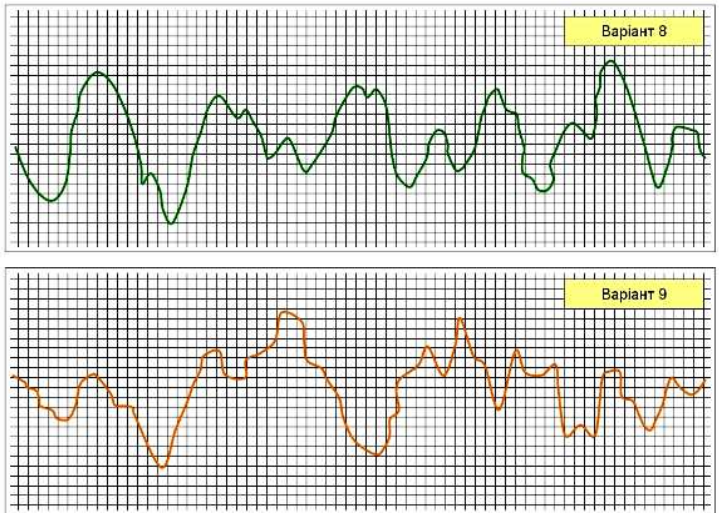


Рисунок 3 – Фрагменти варіантів вимірів та показів приладів до лабораторних робіт

рівництвом одного й того ж викладача. Цей же викладач вів і навчальну дисципліну „Взаємозамінність, стандартизація та технічні вимірювання". Семестровий контроль відбувався за традиційною схемою.

Результати підсумкового контролю ступеня опанування матеріалу курсу навчальної дисципліни „Взаємозамінність, стандартизація та технічні вимірювання" студентами експериментальної групи порівняно з результатами студентів контрольної групи зведено до таблиці 1.

Таблиця 1 – Порівняльні результати підсумкового контролю

Назва навчальної дисципліни, показники	**Група 301 МА** (20 студентів) (експериментальна)		**Група 302 МА** (19 студентів) (контрольна)	
Взаємозамінність, стандартизація та технічні вимірювання *				
Відмінно	–	–	–	–
Добре	11	55,00%	11	57,89%
Задовільно	9	45,00%	8	42,11%
Незадовільно	–	–	–	–
Успішність навчання	100,00%		100,00%	
Якість навчання	55,00%		57,89%	
Середній бал	**3,55**		**3,58**	
Деталі машин **				
Відмінно	–	–	–	–
Добре	10	50,00%	12	57,14%
Задовільно	10	50,00%	9	42,86%
Незадовільно	–	–	–	–
Успішність навчання	100 %		100 %	
Якість навчання	50,00%		57,14%	
Середній бал	**3,50**		**3,57**	

* навчальна дисципліна вивчалась дистанційно в експериментальній групі
** навчальна дисципліна вивчалась в умовах стаціонару в обох групах

Як бачимо, загалом результати експерименту позитивні. Рівень засвоєння матеріалу навчальної дисципліни „Взаємозамінність, стандартизація та технічні вимірювання” в обох групах студентів (як в контрольній, так і експериментальній) за всіма показниками майже збігаються.

В ході експерименту накопичено позитивний досвід проведення викладання навчальної дисципліни технічного напрямку за дистанційною формою.

Водночас у ході експерименту було виявлено деякі проблемні питання, які було вирішено в процесі роботі, а саме:

– переглянуто методику розміщення навчального матеріалу в деяких розділах дистанційного курсу;

– запропоновано здійснювати більш жорсткий контроль за відвідуванням окремими студентами навчального ресурсу та перевірку своєчасного відпрацювання студентами навчального матеріалу.

Викладання лабораторного курсу зазначеної технічної дисципліни з використанням технологій дистанційного навчання можна розглядати як допоміжну форму організації навчального процесу для студентів як денної так і заочної (дистанційної) форми навчання, яка буде сприятимете більш глибокому вивченню теоретичного матеріалу і водночас, дасть студентам уявлення про хід та особливості виконання реальної лабораторної роботи.

Лабораторний практикум зі студентами доцільно проводити в стаціонарних умовах на лабораторній базі кафедри. Адже жоден лабораторний віртуальний симулятор, навіть виконаний на найвищому програмному рівні з доступним інтерфейсом й візуалізацією процесів, що відбуваються, повністю не замінить на сто відсотків реальні вимірювальні прилади або лабораторне устаткування. Хоча, виходячи з принципів доцільності й економічної вигоди, окремі віртуальні лабораторні роботи мають право на існування як самостійний елемент дистанційного навчального курсу.

Як загальний висновок – застосування електронних лабораторних робіт при дистанційній підтримці навчального процесу сприяє реалізації діяльнісного підходу в навчанні та формуванню дослідницьких навичок студента.

Стаття надійшла до редакційної колегії 23.01.13
Рекомендована до друку І Всеукраїнською науково-методичною конференцією «Дистанційна освіта: стан і перспективи для технічних спеціальностей», яка відбулася 10-12 жовтня 2012 р.

УДК 37.018.43

ВПРОВАДЖЕННЯ КОМПЛЕКСНОЇ СИСТЕМИ ДИСТАНЦІЙНОЇ ФОРМИ НАДАННЯ ІНФОРМАЦІЙНОГО НАВЧАЛЬНОГО МАТЕРІАЛУ ТА ПРОВЕДЕННЯ ТЕСТУВАННЯ У НАВЧАЛЬНОМУ ПРОЦЕСІ КАФЕДРИ ВІЙСЬКОВОЇ ПІДГОТОВКИ ІФНТУНГ

Ю.В. Вязніцев, Д.В. Лісафін, А.І. Станецький

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Коновальця, 27а, тел. (0342) 502507,
e-mail: k v p @ n u n g . e d u . u a

Описано впровадження та подальше застосування в навчальному процесі кафедри військової підготовки Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу розробленої на кафедрі комплексної системи дистанційної форми надання навчального матеріалу (електронних навчальних посібників, курсів лекцій, лабораторних практикумів тощо), забезпечення здійснення самостійного контролю отриманих знань тими, хто навчається, за допомогою тестової програми «Тест» та проведення поточного та підсумкового контролів за допомогою тестової програми «Тест КВП ІФНТУНГ» для визначення рівня засвоєння навчального матеріалу студентами.

Метою комплексного використання системи подання навчального матеріалу та контролю рівня його засвоєння із використанням новітніх сучасних технологій є: забезпечення повноти охоплення навчального процесу; відповідність навчальної мети майбутнім професійним завданням; повнота інформаційного забезпечення; засвоєння необхідних знань від обов'язково-мінімальних до поглиблених; систематизація отриманих знань; стимулювання тих, хто навчається, до самостійної роботи; забезпечення можливості здійснення самоконтролю засвоєних знань за допомогою тестової програми «Тест», як мотивації до успішного навчання; інтенсифікація навчального процесу за рахунок застосування новітніх технологій під час проведення занять та здійснення поточного та підсумкового контролю за допомогою тестової програми «Тест КВП ІФНТУНГ».

Програма «Тест КВП ІФНТУНГ» використовується з метою скорочення часу на проведення поточного та підсумкового контролів щодо визначення рівня засвоєння навчального матеріалу студентами, зменшення навантаження науково-педагогічного складу, усунення суб'єктивного фактору «викладач – студент».

Результати комплексного практичного застосування дистанційної форми надання навчального матеріалу (електронних навчальних посібників, курсів лекцій, лабораторних практикумів тощо) тестової програми «Тест» для здійснення самоконтролю засвоєння знань та тестової програми «Тест КВП ІФНТУНГ» для проведення поточного та підсумкового контролю свідчать про систематизацію отриманих знань студентами, внаслідок чого прослідковано підвищення рівня успішності та якості засвоєння навчального матеріалу студентами.

Ключові слова: електронний навчальний посібник, сучасні інформаційні технології, самоконтроль, програма для дистанційного тестування, тестові завдання, база даних тестових завдань, реєстрація на сервері.

Описано внедрение и дальнейшее применение в учебном процессе кафедры военной подготовки Ивано-Франковского национального технического университета нефти и газа разработанной на кафедре комплексной системы дистанционной формы подачи учебного материала (электронных учебных пособий, курсов лекций, лабораторных практикумов и так далее), обеспечение осуществления самостоятельного контроля полученных знаний обучаемыми с помощью тестовой программы «Тест», и проведение текущего и итогового контролей с помощью тестовой программы «Тест КВП ІФНТУНГ» для определения уровня усвоения учебного материала студентами.

Целью комплексного использования системы подачи учебного материала и контроля уровня его усвоения с использованием современных технологий является: обеспечение полноты обхвата учебного процесса; соответствие учебной цели будущим профессиональным заданиям; полнота информационного обеспечения; усвоение необходимых знаний от обязательно-минимальных до углубленных; систематизация полученных знаний; стимулирование обучаемых к самостоятельной работе; обеспечение возможности осуществления самоконтроля усвоенных знаний при помощи программы «Тест», как мотивации к успешному обучению; интенсификация учебного процесса за счет использования современных технологий во время проведения занятий та осуществления текущего и итогового контроля с помощью тестовой программы «Тест КВП ІФНТУНГ».

Программа «Тест КВП ІФНТУНГ» используется з целью сокращения времени на проведение текущего и итогового контролей определения уровня усвоения учебного материала студентами, уменьшения нагрузки научно-педагогического состава, устранения субъективного фактора «преподаватель – студент».

Результаты комплексного практического применения дистанционной формы подачи учебного материала (электронных учебных пособий, курсов лекций, лабораторных практикумов и так далее), тестовой программы «Тест» для осуществления самоконтроля усвоения знаний и тестовой программы «Тест КВП ІФНТУНГ» для текущего и итогового контроля свидетельствуют о систематизации полученных знаний студентами, в следствие чего прослеживается повышение уровня успешности и качества усвоения учебного материала студентами.

Ключевые слова: электронное учебное пособие, современные информационные технологии, самоконтроль, программа для дистанционного тестирования, тестовые задания, база данных тестовых заданий, регистрация на сервере.

The introduction and using in education process of military department of Ivan-Frankivsk national technical university of Oil and Gas is away developed on department complex system of distance form of giving education material (electronically tutorials, lecture courses, laboratory practicums etc.) providing performance of self-control of learnt knowledges for those, who study with using the test program "Test" and making the current and final controls with using test program "Test KVP IFNTUNG" to identify the level of education knowledge by student.

The purpose of using the system of giving education material and to control the education knowledge level with using the brand new technologies is: providing coverage of education process, accordance of education purpose for future professional tasks, coverage of information providing; education knowledge from necessary minimal to advanced; systematization of learnt knowledges; stimulating to the ocon working, providing ability to perform self-control of learnt knowledges with using program "Test" as the motivation to the successful education; intensification of education process with using brand new technologies during spending lessons and performing current and final control with using the test program "Test KVP IFNTUNG".

The program "Test KVP IFNTUNG" is used with the purpose to redused the time of making current and final control according to identification the lever of education knowledge material by students, reducing the intension of teacher's staff, removing the subjective factor "teacher-student"

The results of complex practical using the distance form of giving education material (electronical tutorials, lecture courses, laboratory practicum's etc.), the test program "Test" for performing self-control of knowledge learning and test program "Test KVP IFNTUNG" for making current and final control, testify about systematization of knowledge that was giving to the students, as a result increasing the level of success and quality of education material learning by students was foud.

Keywords: electronic textbook, textbooks, modern information technology, self-control, program for remote testing, tests, database tests, registration server.

Сучасна тенденція удосконалення навчального процесу вищої школи шляхом збільшення часу на самостійну роботу студентів (курсантів) обумовила зміну пріоритетів складових навчального процесу. Насамперед, це:

– забезпечення самостійної роботи студентів (курсантів) сучасним та якісним навчально-методичним обладнанням;

– систематизування які отриманих під час вивчення матеріалу знань студентів (курсантів), шляхом самостійної перевірки рівня засвоєння навчального матеріалу за допомогою (запропонованих) контрольних питань;

– застосування новітніх технологій навчання та інформаційного забезпечення у навчальному процесі щодо забезпечення самостійної роботи для засвоєння навчального матеріалу та здійснення самоконтролю.

На кафедрі військової підготовки Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу (ІФНТУНГ) успішно впроваджена система створення та постійного удосконалення навчально-методичного та інформаційного забезпечення для самостійного вивчення навчального матеріалу, систематизації та перевірки рівня його засвоєння, яка базується на принципах:

– повноти охоплення навчального процесу;

– відповідності навчальної мети майбутнім професійним завданням;

– організації інформаційного забезпечення засвоєння знань від обов'язково-мінімальних до поглиблених;

– стимулювання до самостійної роботи;

– забезпечення можливості здійснення самоконтролю засвоєних знань як мотивації до успішного навчання;

– інтенсифікації навчального процесу за рахунок застосування новітніх технологій під час проведення практичних занять.

На кафедрі організована та активно проводиться робота зі створення та впровадження в навчальний процес електронних підручників, посібників для дистанційного навчання, електронних курсів лекцій та прикладних програм, що відповідає вимогам Указу Президента України від 30 вересня 2010 року № 926/2010 «Про заходи щодо забезпечення пріоритетного розвитку освіти в Україні» щодо розроблення та реалізації пілотних проектів із запровадження підручників на електронних носіях.

На сьогоднішній день на кафедрі військової підготовки ІФНТУНГ забезпечується вивчення навчальних дисциплін (основних розділів військової підготовки) електронними посібниками та курсами лекцій (рис. 1):

- Вогнева підготовка;
- Військово-інженерна підготовка;
- Технічна підготовка;
- Військова топографія;
- Військовий тил;
- Технічні засоби служби пального;
- Забезпечення військ пально-мастильними матеріалами;
- Військові склади пального;
- Бойові і транспортні машини.

На даний час ця робота продовжується – розробляються електронні лабораторні практикуми з дисциплін: «Технічні засоби служби пального», «Хіммотологія», «Застосування пально-мастильних матеріалів», «Контроль якості пально-мастильних матеріалів».

Електронні навчальні посібники (курси лекцій), що розробляються на кафедрі військової підготовки ІФНТУНГ (рис. 2) – це довідкові системи, які поділяються на теми дисциплін, що складаються з розділів. Кожний розділ є електронною сторінкою, де навчальний матеріал подається в обов'язково-мінімальному об'ємі і супроводжується рисунками, фотографіями, схемами, графіками, таблицями тощо.

Для поглибленого засвоєння матеріалу використовується каскадне розгортання прихованих: тексту, додаткових рисунків, фотографій, схем, графіків, таблиць та відеороликів тощо.

Структура побудови електронного навчального посібника дозволяє здійснювати поступовий перехід на сторінки (розділи) або виби-

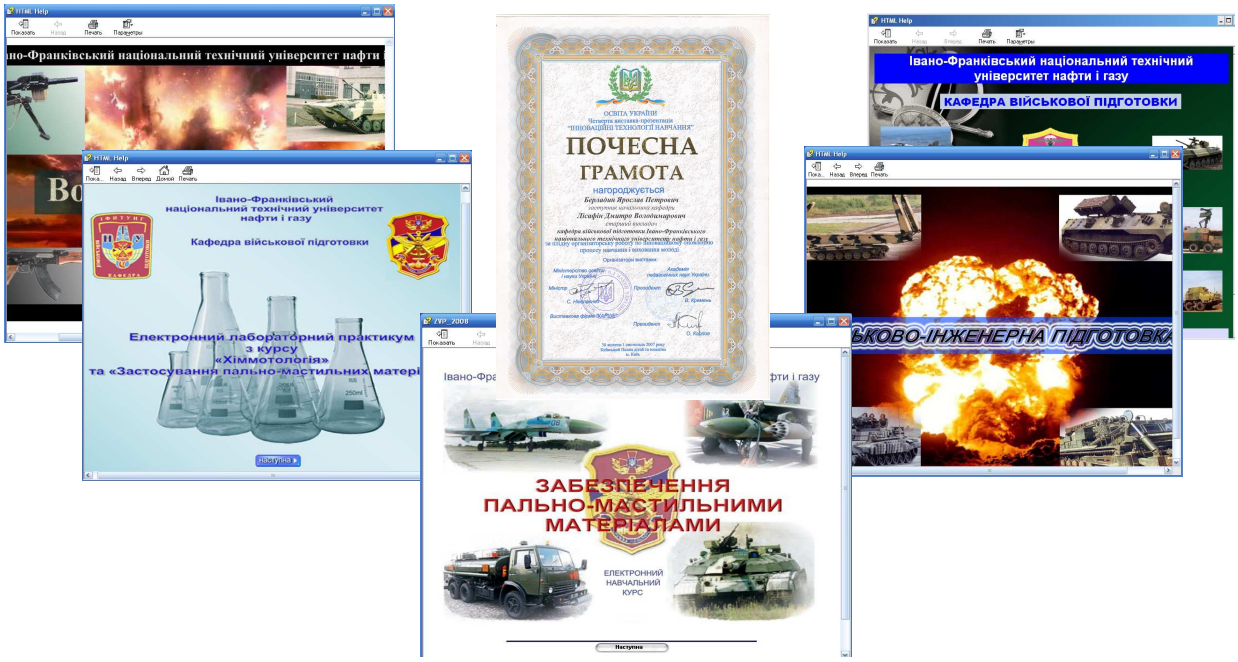


Рисунок 1 – Методика подання навчального матеріалу у електронних навчальних посібниках (курсах лекцій, лабораторних практикумах), що розроблені на кафедрі військової підготовки ІФНТУНГ, відзначена грамотою Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України

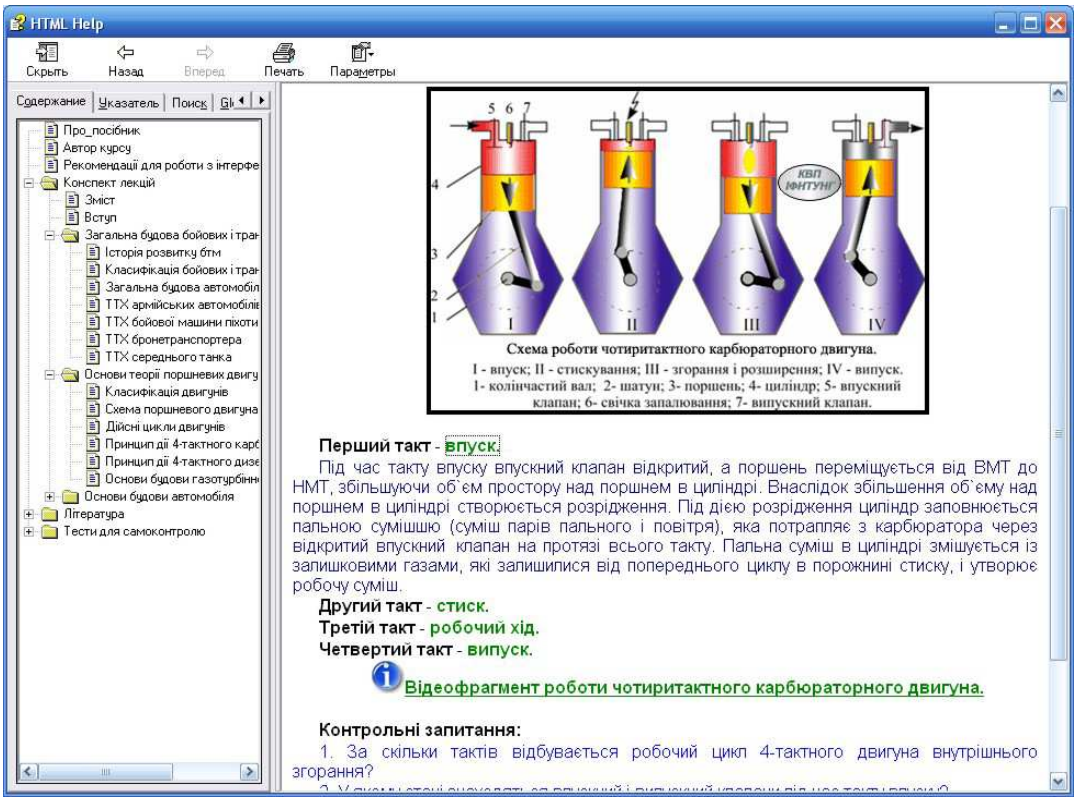


Рисунок 2 – Каскадне розгортання тексту для поглибленого засвоєння навчального матеріалу

рати конкретний розділ навчального матеріалу у самому змісті навчального посібника.

З метою систематизування знань, отриманих під час вивчення матеріалу, студентам (курсантам) надається можливість самостійно перевіряти рівень засвоєння навчального матеріалу за допомогою запропонованих контрольних питань, які є у кінці кожного розділу

Для забезпечення здійснення самоконтролю засвоєних знань, як мотивації до успішного навчання, студентам (курсантам) пропонується перейти в програму «Тест» та здійснити самостійне тестування засвоєних знань за даний розділ (рис. 3).

Тестові завдання даної програми «Тест» можуть бути таких типів:

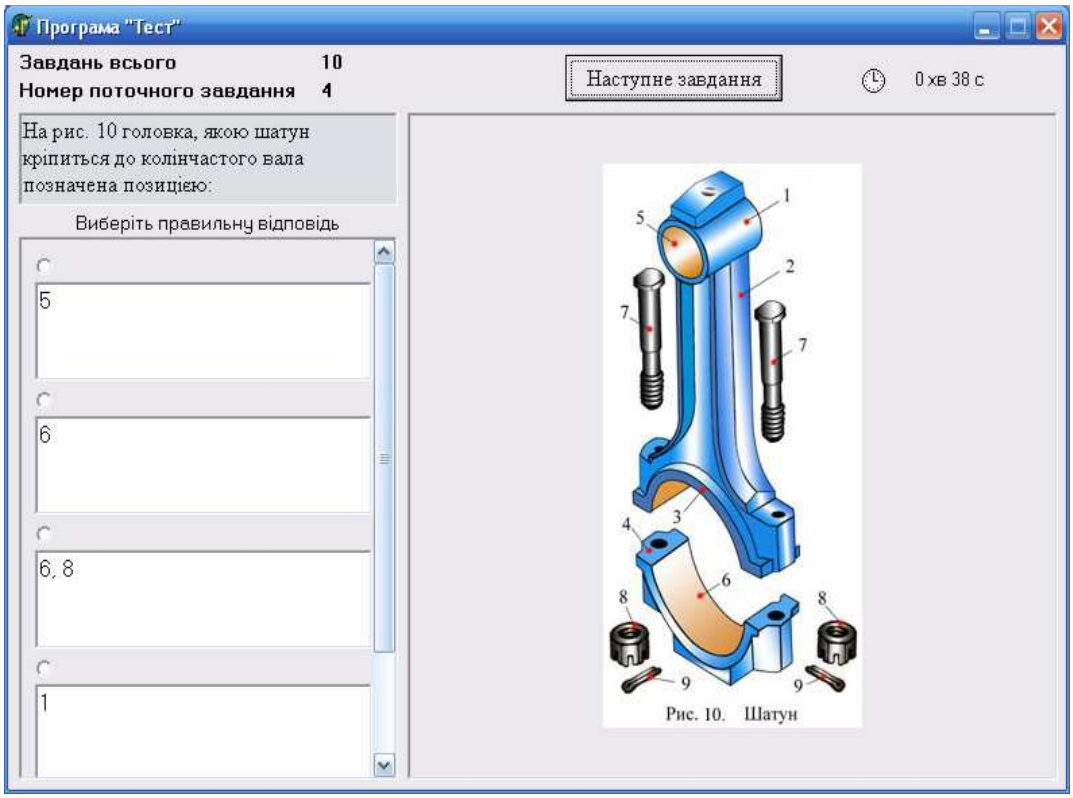


Рисунок 3 – Тестове завдання для проведення самоконтролю засвоєння навчального матеріалу за допомогою тестової програми «Тест»

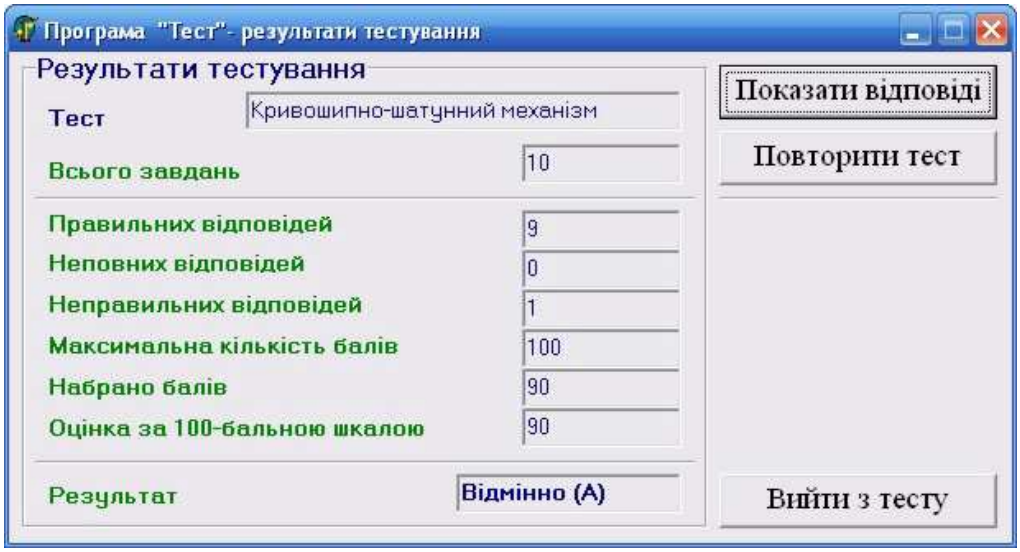


Рисунок 4 – В кінці кожного тестування студент отримує результати перевірки знань за допомогою програми «Тест»

– з однією правильною відповіддю;
– з декількома правильними відповідями (з визначенням, яка найбільш повна);
– з вибором послідовності відповідей;
– з вибором відповідності відповідей;
– з безпосереднім введенням правильної відповіді.

Для надання кожної відповіді визначається певний час. Тестове питання може містити як текстову частину, так і рисунки, креслення, фотографії тощо.

Дане тестування студент (курсант) може проводити неодноразово з переглядом наданих відповідей на питання та їх правильних рішень.

В кінці кожного тестування студент отримує результати перевірки знань (рис. 4).

Як показали спостереження, програма для проведення самостійного контролю «Тест» стимулює студентів до засвоєння навчального матеріалу та отримання більш глибоких знань, сприяє систематизації отриманих знань, придбанню впевненості в засвоєнні навчального матеріалу.

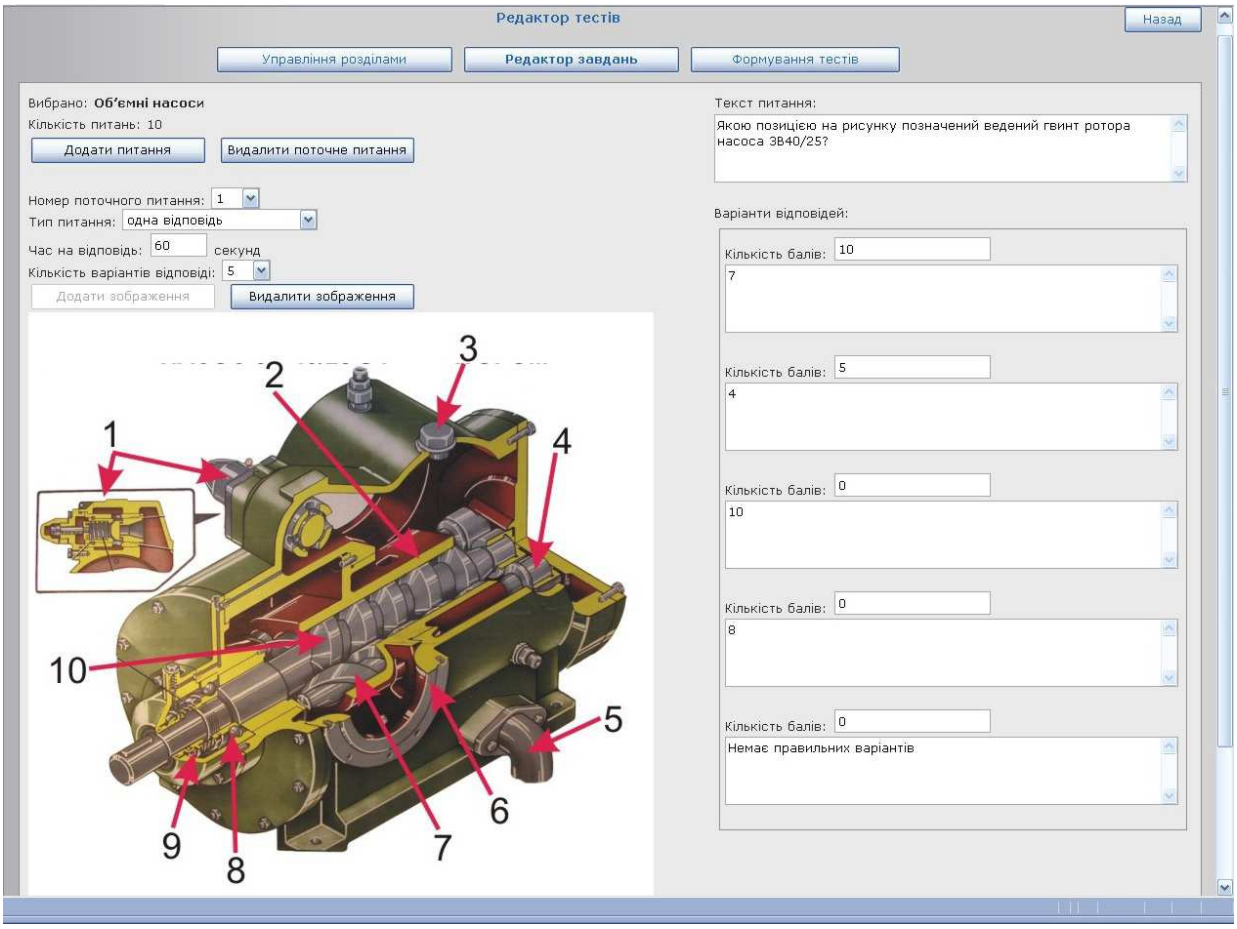


Рисунок 5 – Редактор тестових завдань для проведення контролю засвоєння навчального матеріалу за допомогою тестової програми «Тест КВП ІФНТУНГ»

Форма та умови проведення даного тестування повністю відповідають проведенню поточного та підсумкового контролю рівня засвоєння навчального матеріалу студентами (курсантами), який здійснюється за допомогою програми «Тест КВП ІФНТУНГ».

Дана програма розроблена з метою скорочення часу на проведення поточного та підсумкового контролю рівня засвоєння навчального матеріалу студентами, зменшення навантаження науково-педагогічного складу, усунення суб'єктивного чинника «викладач-студент», розроблена, пройшла апробацію як науковий експеримент та допущена наказом по університету до застосування в навчальному процесі кафедри військової підготовки.

Програма «Тест КВП ІФНТУНГ» успішно використовується не тільки на кафедрі військової підготовки, а також і на інших провідних кафедрах Івано-Франківського НТУНГ.

Тестові завдання даної програми, аналогічно до тестової програми «Тест», можуть бути наступних типів (рис. 5):

– з однією правильною відповіддю;

– з декількома правильними відповідями (відповідно з різними оцінками);

– з вибором послідовності відповідей;

– з вибором відповідності відповідей;

– з безпосереднім введенням правильної відповіді.

Для надання кожної відповіді визначається певний час. Тестове питання може містити як текстову частину, так і рисунки, креслення, фотографії тощо.

Якщо на запитання в тесті пропонується декілька варіантів відповідей з різною повнотою інформації щодо поставленого питання, на кожну відповідь викладачем планується (виставляється) відповідна кількість балів. Варіанти відповідей також можуть передбачати навмисне викладення неправильної інформації, яка оцінюється, як правило, оцінкою «0» або від'ємними балами, за рішенням викладача.

Всі тестові питання можуть бути поділені за рівнем складності на групи (до 10-ти). При формуванні тестового завдання можна запрограмувати у процентному відношенні – скільки питань буде і якої групи складності.

На базі тестових питань можуть формуватися тестові завдання для проведення як поточних, так і підсумкових видів контролю, використовуючи створену базу питань з даного матеріалу (тематики). При цьому контрольні питання можуть формуватися за тематикою однієї теми або за визначеною та попередніми темами одночасно.

При здійсненні поточного або підсумкового контролю, з метою запобігання звинувачень щодо необ'єктивного підходу до здійснення контролю знань опитуваних осіб програмою

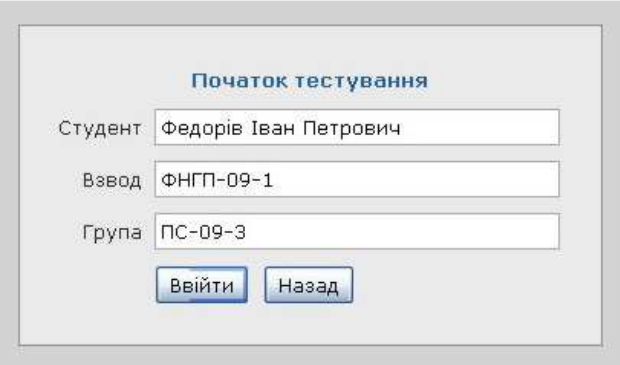


Рисунок 6 – Реєстраційна сторінка тестової програми «Тест КВП ІФНТУНГ»

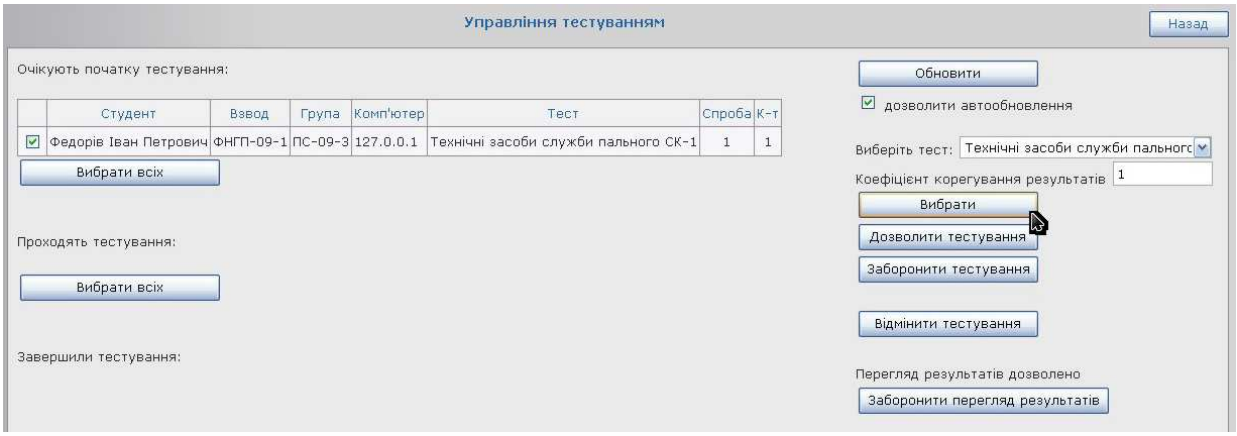


Рисунок 7 – Сторінка управління проведення тесту тестової програми «Тест КВП ІФНТУНГ»

передбачається можливість проведення контролю для групи студентів, які одночасно проходять тестування на комп'ютерах, за однаковими питаннями. В той же час для кожного студента ті чи інші однакові питання будуть мати різні порядкові номери у тестовому завданні, а крім того, варіанти відповідей на ці питання будуть представлені в різному порядку.

Даною програмою тестування передбачено застосування коефіцієнту, який враховує з якої спроби здається тест, тобто, якщо студент проходить тестування повторно, то йому, за кожну спробу, зменшується загальна оцінка на 2%. Необхідно також звернути увагу на те, що на кафедрі військової підготовки позитивно відносяться до прагнення студентів перездати тест з метою отримання більш високого балу, правда на це дається тільки одна спроба у семестрі.

При необхідності тестові завдання можна роздрукувати для забезпечення проведення письмової форми контролю. Кількість формування варіантів завдань – необмежена.

Кожен студент (курсант), який проходить тестування на комп'ютері, реєструється (рис. 6) на сервері під контролем викладача (адміністратора). Після отримання дозволу від адміністратора студент (курсант) розпочинає тестування (рис. 7).

Форма та умови проведення тестування відповідають тим умовам, за якими студент (курсант) здійснював самостійне тестування за допомогою програми «Тест», коли самостійно вивчав даний матеріал з електронних посібників. По завершенню тестування студент (курсант) отримує оцінку. Дана оцінка заноситься в архів.

Дана програма дає змогу переглянути результати тестування та відібрати результати тестування з архіву за одним із запропонованих варіантів:

– для окремого студента за окремим тестом дисципліни;

– для окремого студента за всіма тестами однієї дисципліни;

– для окремого студента за тестами всіх дисциплін, що викладаються на кафедрі;

– для студентів окремої академічної групи (навчального взводу) за окремим тестом,

а також, враховуючи те, що на кафедрі військової підготовки ІФНТУНГ навчаються студенти з різних факультетів та з різних навчальних закладів, можна відібрати з архіву результати тестування студентів певної академічної групи, певного факультету та певного навчального закладу (рис. 8).

Всі результати тестування можна отримувати також у друкованому вигляді, що значно спрощує ведення обліку успішності студентів та інформування деканатів різних навчальних закладів.

За результатами практичного комплексного застосування у навчальному процесі кафедри військової підготовки ІФНТУНГ навчального матеріалу електронних посібників (курсів лекцій, лабораторних практикумів), тестової програми «Тест» для самоконтролю засвоєння знань

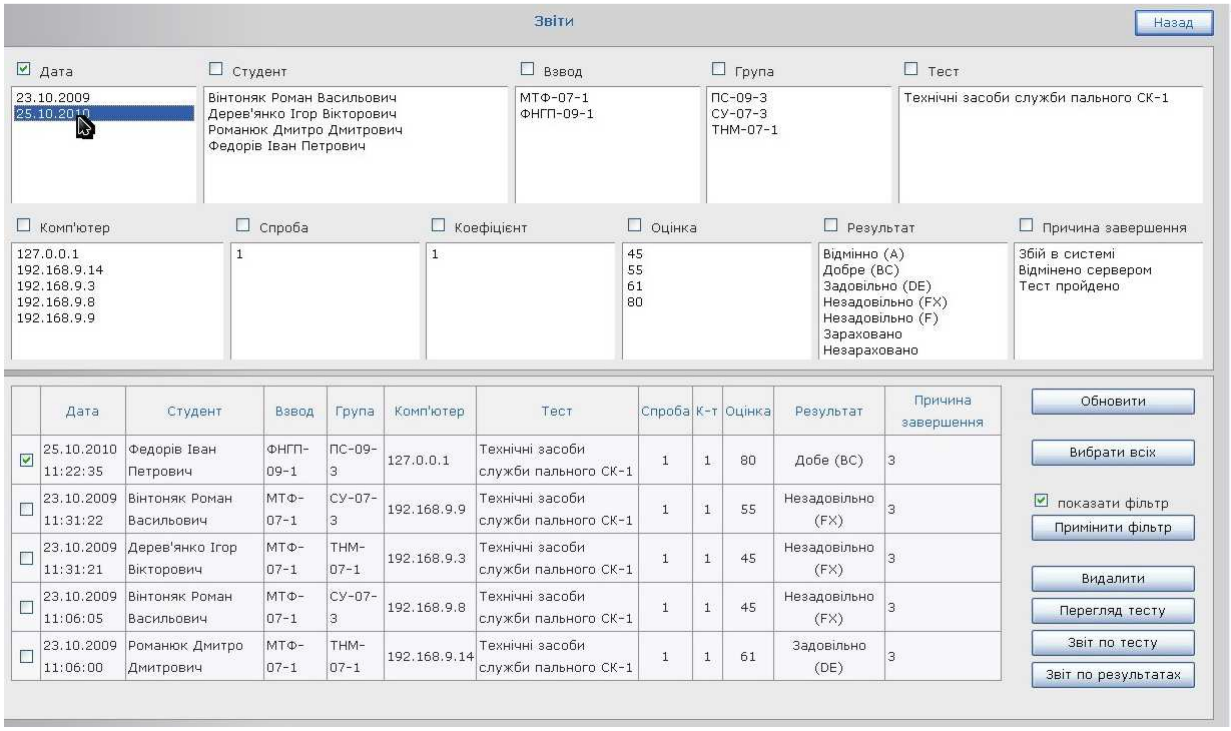


Рисунок 8 – Контроль проведених тестувань за вибраними параметрами сортування

та тестової програми «Тест КВП ІФНТУНГ» для проведення поточного та підсумкового контролю рівня засвоєння навчального матеріалу студентами (курсантами), можна зробити такі висновки.

1. На початковому етапі здачі поточних та підсумкових контролів за першою спробою успішно проходило тестування близько половини студентів, за двома спробами їх кількість складала біля двох третин студентів, здання тесту рештою решти студентів необхідно було додаткові 1-3 спроби.

2. На наступних етапах здачі поточних та підсумкових контролів кількість студентів: які проходять тестування за першою спробою, зростає (під кінець навчання на кафедрі військової підготовки вони складають приблизно три чверті від загальної кількості студентів); яким необхідно для проходження тестів три та більше спроб – практично зменшується до нуля.

3. З наближенням завершення навчання на кафедрі військової підготовки якість засвоєння навчального матеріалу суттєво зростає в порівнянні з початковим етапом, що свідчить про розвиток системного підходу студентів до вивчення навчального матеріалу із застосуванням: новітніх технологій інформування – електронних посібників (курсів лекцій, лабораторних практикумів); проведення самоконтролю засвоєних знань навчального матеріалу (в тому числі за допомогою тестової програми «Тест»), що дає можливість успішно пройти поточні та підсумкове тестування рівня засвоєння знань за допомогою тестової програми «Тест КВП ІФНТУНГ».

Стаття надійшла до редакційної колегії 23.01.13
Рекомендована до друку І Всеукраїнською науково-методичною конференцією «Дистанційна освіта: стан і перспективи для технічних спеціальностей», яка відбулася 10-12 жовтня 2012 р.

УДК 681 3 (075.8) 378.14.004

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ В ОСВІТІ — ДОСЯГНЕННЯ ТА ПРОБЛЕМИ МОТИВАЦІЇ

[1]В.І. Векерик, [2]В.Ю. Степаненко, [2]К.Г. Левчук

[1]ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 727159, e-mail: tm@nung.edu.ua

[2] Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», 03056, м. Київ, пр. Перемоги, 37, e-mail: k.levchuk58@kpi.ua

Розглянуто питання, що стосуються інформаційних та комунікаційних технологій в освіті, а також зміни вимог до роботи викладача при впровадженні дистанційної освіти.
Ключові слова: дистанційне навчання, інноваційна освіта, інформаційне освітнє середовище, комунікаційні технології, телекомунікаційні засоби, мотивація навчання.

Рассмотрены вопросы, касающиеся информационных и коммуникационных технологий в образовании, а также изменение требований к работе преподавателя при внедрении дистанционного образования.
Ключевые слова: дистанционное обучение, инновационное образование, информационное образовательная среда, коммуникационные технологии, телекоммуникационные средства, мотивация обучения.

The questions relating to information and communication technologies in education, and changing requirements of teachers in the implementation of distance education.
Keywords: distance learning, innovative education, information educational environment, communication technology, telecommunication equipment, motivation training.

Вступ. Високі темпи науково-технічного прогресу призводять до стрімкого старіння знань фахівців та зумовлюють необхідність продовження освітнього процесу протягом усього активного періоду життя. Інформаційні технології стають рушійною силою змін, що відбуваються у суспільстві. Повною мірою це стосується галузі освіти. Традиційні методики і засоби навчання виявляються недостатніми для виконання підвищених вимог до рівня підготовки випускників вищої школи.

Починає формуватися нова перспективна галузь – інформаційні технології в освіті. До неї відноситься проблематика інтелектуальних навчальних систем, відкритої освіти, дистанційного навчання, інформаційних освітніх середовищ. Ця галузь стикається, з одного боку, з педагогічними та психологічними проблемами, а, з іншого, з результатами, що досягнуті в телекомунікаційних технологіях і мережах; комп'ютерних системах обробки й візуалізації інформації; автоматизованих системах моделювання складних процесів.

Постановка задачі. Безперечно коло питань, що є об'єктом інформаційних технологій в освіті, надзвичайно широке. Тому зупинимося лише на тих питаннях, що виникають під час впровадження інформаційних технологій в освітні послуги.

Досвід апробації впровадження інноваційних засобів у навчальний процес довів, що отримання дистанційної освіти одночасно і захоплююче, і проблематичне, тому впровадження нових, нетрадиційних форм навчання передбачає цілу низку труднощів.

Інформаційні та комунікаційні технології. Інформаційні та комунікаційні технології (ІКТ) – це узагальнене поняття, що описує різні пристрої, механізми, способи, алгоритми обробки інформації. Найважливішим пристроєм ІКТ є комп'ютер, який має відповідне програмне забезпечення та засоби телекомунікації.

В сучасних системах освіти розповсюджені офісні прикладні програми: електронні таблиці, програми підготовки презентацій, системи керування базами даних, органайзери, графічні й математичні пакети. З появою комп'ютерних мереж освіта набула нової якості, що пов'язана з можливістю оперативно отримувати інформацію з будь-якої точки земної кулі через доступ до світових інформаційних ресурсів (електронних бібліотек, баз даних).

У мережі Інтернет доступні й інші поширені засоби ІКТ, а саме: електронна пошта, списки розсилання, групи новин, форуми і чати. Розроблено спеціальні програми для спілкування в реальному режимі часу, що дає змогу після встановлення зв'язку передавати текст, що вводиться з клавіатури, звук, зображення і будь-які інші файли. Ці програми дають змогу організувати спільну роботу віддалених користувачів з програмою, запущеною на локальному комп'ютері. За допомогою спеціального обладнання через Інтернет з'явилась можливість проводити аудіо- та відеоконференції.

Для забезпечення ефективного пошуку інформації в телекомунікаційних мережах існують автоматизовані пошукові засоби мета яких – збирати дані про інформаційні ресурси глобальної комп'ютерної мережі та надавати користувачам послугу швидкого пошуку. За допомо-

гою пошукових систем можна знаходити документи, мультимедійні файли та програмне забезпечення, адресну інформацію про організації та людей.

За допомогою мережевих засобів ІКТ можна організувати доступ до навчально-методичної інформації, організувати оперативну консультаційну допомогу, проводити віртуальні навчальних занять (семінарів, лекцій) у реальному режимі часу. Існує кілька основних класів інформаційних і телекомунікаційних технологій, які мають значення з точки зору систем відкритої і дистанційної освіти – це відеозаписи та телебачення. Відеозаписи та відповідні засоби ІКТ дозволяють великому числу студентів прослуховувати лекції кращих викладачів як в спеціалізованих відеокласах, так і в домашніх умовах. Навчальні відеопрограми можна широко використовувати, і вони є яскравим прикладом дистанційного навчання. Завдяки ІКТ з'являється перспектива транслювати лекції для великої аудиторії з метою підвищення загального розвитку даної аудиторії без подальшого контролю засвоєння знань, а також можливість згодом перевіряти знання за допомогою спеціальних тестів та іспитів.

Потужною технологією, що дозволяє зберігати й передавати чималий об'єм навчального матеріалу, є електронні видання, що розповсюджуються в комп'ютерних мережах чи записані на портативних пристроях зберігання інформації: картах пам'яті, USB-флешках, зовнішніх жорстких дисках. Індивідуальна робота з ними дає глибоке засвоєння і розуміння матеріалу. Після відповідного доопрацювання, ця технологія дає змогу пристосувати існуючий матеріал до індивідуального користування, надає можливості для самонавчання і самоперевірки отриманих знань. Поряд з традиційною друкованою продукцією, освітні електронні видання дозволяють подавати матеріал в динамічній графічній формі.

Усі існуючі засоби інформаційних та комунікаційних технологій можна класифікувати, як:

• навчальні – надають знання, формують вміння та досвід практичної діяльності, а також забезпечують необхідний рівень засвоєння;

• тренажери – призначені для відпрацювання вмінь та кращого засвоєння навчального матеріалу;

• інформаційно-пошукові та довідкові – надають відомості та формують досвід систематизації інформації;

• демонстраційні – візуалізують об'єкти, явища, процеси з метою їх дослідження;

• імітаційні – анімують структурні та функціональні характеристики;

• лабораторні – дозволяють проводити експерименти на віртуальному або реальному обладнанні, навіть знаходячись на чималих відстанях;

• моделюючі – моделюють об'єкти, явища, процеси з метою їх дослідження;

• розрахункові – автоматизують процес і дозволяють проводити різноманітні розрахунки;

• навчально-ігрові – призначені для моделювання учбових ситуацій в ігровій формі.

Дистанційні технології навчання. Дистанційне навчання у вигляді заочного навчання зародилося на початку XX-го сторіччя. Сьогодні дистанційно можна отримати вищу освіту, вивчити іноземну мову, підготуватися до вступу тощо. Дистанційна технологія навчання (освітнього процесу) на сучасному етапі – це сукупність методів і засобів навчання та адміністрування, які забезпечують проведення навчального процесу на відстані за допомогою використання сучасних інформаційних і телекомунікаційних технологій.

Метою дистанційного навчання є створення інтегрованого середовища, що об'єднує комп'ютерні інформаційні джерела, електронні бібліотеки, відео- і аудіотеки, підручники і навчальні посібники. При розробці навчальних курсів наголос робиться на самостійну роботу студентів, їх колективну творчість, проведення міні-досліджень різного рівня. Передбачається велика кількість завдань, розрахованих на самостійне опрацювання, з можливістю отримання консультацій.

Дистанційне навчання надає можливості навчати велику кількість окремих студентів та студентських груп за різними навчальними програмами, але в кожному дистанційному курсі можна навчати виключно за однією навчальною програмою. Тому потрібно мати окрему web-сторінку дисципліни, де будуть розташовані робочі навчальні плани і програми, поміщено графік навчання, матеріал для вивчення, індивідуальні завдання для кожного студента, завдання на індивідуальні роботи, питання до заліків чи іспитів, рейтингова система оцінювання студентів, поточне оцінювання студентів за курсом та інше.

З іншого боку, дистанційні курси – це незамінні помічники студентів. Навіть якщо студент не пропустив лекцію, можливі прогалини у начитаному матеріалі: студент може не відразу, або недостатньо зрозуміти, усвідомити матеріал й бажає поновити викладене лектором. За наявності дистанційного навчання у студента з'являється можливість переглянути уважно і поглиблено той матеріал, що намагався йому розтлумачити викладач. Якщо студент унаслідок своєї недостатньої підготовки або індивідуальних особливостей не встигає засвоювати матеріал на аудиторних заняттях в темпі його викладання, що закладений у навчальному плані, то він має можливість витратити більше часу на самостійну роботу.

Система дистанційного навчання забезпечує високоякісне подання навчальних матеріалів тим, хто навчається, і стандартизацію оцінювання результатів навчання, що є вкрай важливим для пооперацийного контролю і накопичення рейтингових балів за різнобічну навчально-пізнавальну діяльність студентів.

Мотивація навчання за новітніми формами. Незважаючи на новизну подібного осві-

тнього формату, більшість традиційних проблем сьогодні не вирішуються. Одна з найбільших перешкод – це втрата студентом мотивації до продовження навчання. А завдяки специфічності умов навчатися он-лайн, з котрими стикається студент, вона посилюється. В самотності (індивідуалізації), за відсутності справжніх співучнів, котрі відіграють роль резонансного щита, працювати за розробленим навчальним графіком, занурення у навчальний процес для студента, який живе «весело» від сесії до сесії, стає справжньою проблемою.

Індивідуалізація згортає і так дефіцитне в навчальному процесі «живе» спілкування учасників освітнього процесу – викладачів і студентів, студентів між собою – і пропонує їм спілкування у вигляді «діалогу з комп'ютером».

Протягом всього терміну навчання студент займається тим, що мовчки споживає інформацію. Загалом спілкування «викладач-студент» і «студент-студент» виявляється вилученою. Студент не має достатньої практики розмовного спілкування, формування і формулювання думки на професійній мові. Без розвинутої практики спілкування, як показують психологічні дослідження, не формується і монологічне спілкування з самим собою, те, що називають самостійним мисленням. Адже питання, задане наодинці, – показник наявності самостійного мислення. Якщо піти по шляху загальної індивідуалізації навчання за допомогою персональних комп'ютерів, можна згубити можливість формування творчого мислення. Тому необхідно в процесі навчання з використанням засобів ІКТ проводити on-line семінари, ділові ігри, групові консультації, обговорювати явища та процеси, що демонструються, а також обов'язково наживо спілкуватися на консультаціях чи тренінгах.

Водночас дистанційна форма навчання через свою новітність поки ще не «обросла» допоміжними системами, відомими нам з традиційної структури освіти. А лише саме вони допомагають студентам зберегти мотивацію навчання. Недолік соціальної взаємодії може стати однією із існуючих причин втрати мотивації студентами, що навчаються он-лайн.

Втрата мотивації може стати серйозною проблемою, оскільки студенту у цьому випадку досить важко зосередитись на виконанні завдань. Студенту значно важче готуватися до здачі іспитів, тестування і закінчення проектів. Саме мотивація провокує людину долати в ході навчання різноманітні труднощі, почуття втоми й нудьги.

Однак, бажання і спроможність навчатись самостійно може стимулюватись наступними прийомами:

• сформулювати мету: насамперед зосередитись завданнях, які можна легко розв'язати. Робіть у календарі спеціальні позначки про виконання завдань, досягнення кожної з поставлених цілей. Це сприяє появі почуття гордості за свою роботу;

• спілкування з іншими (членами сім'ї, друзями, керівником, включаючи спілкування і в інтернеті) про предмети, котрі вивчаються, обговорюються проблеми навчання та розклад;

• намагайтеся бути активними на інтернет-форумах, присвячених курсу, що вивчається. Це дозволить студентам спілкуватись між собою, познайомитись з віртуальними одногрупниками. Крім того, існує можливість створювати схожі групи в соціальних мережах, куди можуть потрапити колеги з різних вишів.

Досягнення інформаційних та комунікаційних технологій. Інформаційні та комунікаційні технології дійсно є ефективними, сприяють реалізації відомих принципів організації навчального процесу, наповнюють діяльність викладача принципово новим змістом, що дозволяє йому зосереджуватись на своїх головних функціях – навчальній, виховній та розвиваючій.

Найчастіше однією з переваг навчання з використанням засобів ІКТ називають індивідуалізацію навчання. Це і удосконалення організації викладання, і підвищення рівня самопідготовки студентів, і індивідуальна робота викладача з кожним студентом. Логічним розвитком ІКТ стало дистанційне навчання, яке безповоротно входить в систему надання освітніх послуг.

Відтепер учбовий процес стає прозорим і виходить за «двері» замкненої аудиторії, що не може викликати супротив значної аудиторії викладацького складу будь-якого університету.

Проблеми впровадження інформаційних та комунікаційних технологій. Досвід впровадження дистанційних технологій в освіті виявило цілу низку проблем:

• консерватизм системи освіти стримує її динамічність;

• відсутність єдиної нормативно-правової бази, єдиного навчально-методичного забезпечення, єдиних програм навчальних дисциплін за однаковим напрямом підготовки у різних підрозділах одного університету та в різних університетах;

• недостатнє технічне забезпечення навчальних закладів (кампуси вишів не покриті Wi-Fi з вільним доступом);

• потреба в керівних й педагогічних кадрах, здатних працювати в умовах інноваційних змін в освітніх системах. Професорсько-викладацький склад вишів формується не за рівнем кваліфікації у своїй професійній діяльності претендентів на посади, а за вченими званнями.

Проблеми навчання за інформаційними та комунікаційними технологіями. Розвиненість інформаційно-пошукових і довідкових систем поряд з тим, що пришвидшується процес надання даних та формується досвід систематизації інформації, призводить до небажаних явищ в процесі навчання. Як відомо, у будь-якої людини за наявності легкого доступу до мережі Інтернет, спрацьовує принцип економії сил. Так само і студенти із задоволенням завантажують з мережі готові реферати, проекти,

доповіді, розв'язки задач тощо. Сьогодні це вже звичайний факт, який не сприяє покращенню навчання. Нині викладачу необхідно працювати над складанням індивідуальних і нетипових завдань, які вимагають у студентів самостійного мислення, а також достатнього рівня попередніх знань.

Активізація процесу навчання вимагає від викладача клопіткої праці на підготовку електронних підручників, інтерактивних курсів, комп'ютерних практикумів, лабораторних робіт тощо. Але ця праця виправдана, бо менше часу необхідно витрачати на аудиторних заняттях (лекціях та практичних) на пояснення того чи іншого явища, принципу роботи механізму, процесу. Викладач на попередньому занятті пропонує ознайомитись з демонстрацією об'єкта, роботи механізму чи інтерактивним уроком. І вже в аудиторії студент, який має попередню уяву, краще сприймає новий матеріал.

Відомо, що багато часу викладачі витрачають на пояснення нового матеріалу, оскільки студенти мають різний рівень попередніх знань, тож швидкість засвоєння матеріалу у кожного неоднаково. І тут у пригоді стають змодельовані, візуалізовані чи анімовані об'єкти, явища тощо, які сприяють до кращому розумінню матеріалу, що викладається, і, як наслідок, більшій зацікавленості студентів.

Висновки. Про позитивні й негативні наслідки інформаційних та комунікаційних технологій можна говорити ще багато. Головне, що ІКТ остаточно увійшли в процес освіти і не тільки утримують свої позиції, а й постійно модернізуються.

Сучасний викладач повинен не тільки володіти знаннями в галузі ІКТ, але й бути фахівцем щодо їх застосування у своїй професійній діяльності. Впровадження дистанційної системи у навчальний процес зумовлює додаткове навантаження на викладача для створення та керування електронними ресурсами, та водночас система в автоматичному режимі точно відслідковує інтенсивність роботи як викладача, так і тих, хто навчається.

Ефективне застосування інформаційних технологій у навчальному процесі сприяє розвитку у студентів теоретичного мислення, справжньої інтеграції процесу освіти нашої країни з рівнем освіти розвинених західних країн, в яких подібні системи застосовуються вже тривалий час.

Інформаційні освітні технології дозволяють наповнити освітній процес використанням новітніх засобів мультимедіа, включаючи гіпертекстові і гіпермедіа-посилання, графіки, рисунки, схеми, діаграми, анімацію, фрагменти відеофільмів і звуковий супровід. Тому, на думку авторів, використання інформаційних технологій у процесі навчання сприятиме активізації мислення, сприйняття та пізнавальної активності студентів.

Література

1 Андреев А. А. Дидактические основы дистанционного обучения. – Режим доступу http://aqua.iefb.agtu.ru/dist/Biblio/Dissert/dissert_Andreev/br/ogl-b.htm

2 Концепція розвитку дистанційної освіти в Україні, затверджена Міністром освіти України від 20.12.2000 р.

3 Кухаренко В. Н. Дистанционное обучение. Условия применения. Дистанционный курс / В. Н. Кухаренко, Е. В. Рыбалко, Н. Г. Сиротенко; Под ред. Кухаренко В. Н. – Харьков: Торсинг, 2002. – 320 с.

4 Левчук К. Г. Інтерактивні моделі у викладанні механіки / К. Г. Левчук // Управління в освіті: Збірник матеріалів конференції V міжнародної наук.-практ. конф. (Львів, 14-16 квітня 2011 р.). – Львів, 2011. – С.163-164.

5 Левчук К. Г. Застосування інформаційних технологій у викладанні фундаментальних наук / К. Г. Левчук // Болонський процес: стан та перспективи розвитку вищої освіти в Україні: Тези доповідей IX всеукраїнської наук.-метод. конф. (Київ, 2010 р.) Збірник тез доповідей, Частина 2. – Київ: НТУУ «КПІ», 2010.– 205-207 с.

6 Степаненко С. Г. Діяльність викладача як основа керування процесом навчання / С. Г. Степаненко, В. Ю. Степаненко // Управління в освіті: тези доповідей V міжнародної наук.-практ.конф., (Львів, 14-16 квітня 2011 р.). – Львів, 2011. – С. 289-290.

Стаття надійшла до редакційної колегії 23.01.13
Рекомендована до друку І Всеукраїнською науково-методичною конференцією «Дистанційна освіта: стан і перспективи для технічних спеціальностей», яка відбулася 10-12 жовтня 2012 р.