

Актуальні питання нафтогазової галузі

УДК 622.279.5

DOI: 10.31471/1993-9973-2018-3(68)-7-11

ОЦІНКА ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ І ЗУПИНКИ ВИДОБУВНИХ СВЕРДЛОВИН ПІД ЧАС НАГНІТАННЯ АЗОТУ У ВИСНАЖЕНИЙ ГАЗОВИЙ ПОКЛАД

Р.М. Кондрат, Л.І. Хайдарова

ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел./факс (03422) 4-21-95,
e-mail: rengr@nung.edu.ua, lilya.matiishun@gmail.com

Охарактеризовано основні напрямки підвищення вуглеводневилучення з виснажених газових покладів і можливі варіанти нагнітання азоту у пласт. Для умов виснаженого гіпотетичного газового покладу виконано математичне моделювання процесу витіснення залишкового природного газу азотом за допомогою модуля композиційного моделювання GEM, який входить в програмний комплекс CMG (Computer Modelling Group). За результатами досліджень встановлено вплив на коефіцієнт газовилучення по залишковому газу та інші технологічні показники дорозробки покладу роботи і зупинки видобувних свердловин під час нагнітання у поклад азоту з різним періодом часу.

Ключові слова: поклад, свердловина, розробка, експлуатація, нагнітання, газ, азот, газовилучення.

Охарактеризованы основные направления повышения углеводородоотдачи с истощенных газовых залежей и возможные варианты нагнетания азота в пласт. Для условий истощенной гипотетической газовой залежи выполнено математическое моделирование процесса вытеснения остаточного газа азотом при помощи модуля композиционного моделирования GEM, входящего в программный комплекс CMG (Computer Modelling Group). По результатам исследований установлено влияние на коэффициент газоотдачи по остаточному газу и другим технологическим показателям доработки залежи работы и остановки добывающих скважин при нагнетании в залежь азота с разным периодом времени.

Ключевые слова: залежь, скважина, разработка, эксплуатация, нагнетание, газ, азот, газоотдача.

The main directions of increasing hydrocarbon output from depleted gas deposits and possible options of injecting nitrogen into the reservoir are described. For the conditions of a depleted hypothetical gas reservoir, a mathematical modeling of the process of displacement of the residual gas by nitrogen using the composite modeling module GEM, which is part of the CMG (Computer Modeling Group) program, was performed. Based on the results of the research, the effect on the gas recovery factor for the residual gas and other technical indicators was established on the development of the work and production wells shut-down zone when nitrogen was injected into the deposit with different time periods.

Key words: reservoir, well, development, operation, injection, gas, nitrogen, gas recovery.

Постановка проблеми дослідження

Значна кількість покладів природних газів України перебуває на завершальній стадії розробки, а окремі з них – на межі припинення рентабельного видобутку газу. Такі поклади характеризуються низькими пластовими тисками і дебітами свердловин, але ще містять значні залишкові запаси природного газу у слабкодренованих, низькопроникних ділянках і прошарках. За промисловими даними по покладах з

макронеоднорідними колекторами і нерівномірним розміщенням видобувних свердловин на площі газоносності очікуються досить низькі значення кінцевого коефіцієнта газовилучення, які є меншими за середнє значення коефіцієнта газовилучення при газовому режимі (85-90 %). В умовах дефіциту вуглеводневої сировини і вичерпаності розвіданих запасів вуглеводнів збільшення ступеня вилучення газу з виснажених родовищ має державне значення.

До основних напрямків підвищення вуглеводневилучення з виснажених газових покладів відносяться: мінімізація значень кінцевого пластового тиску у зоні дренування видобувних свердловин, що досягається мінімізацією тиску на вході в установку комплексної підготовки газу (УКПГ) і втрат тиску у привибійній зоні, стовбурі і викидних лініях свердловин, у процесі їх експлуатації; забезпечення однакових (близьких) значень мінімального кінцевого пластового тиску у різних ділянках пласта на покладах з макронеоднорідними колекторами, що досягається проведенням відповідних геолого-технічних заходів із вилучення залишкового газу зі слабкодренованих, низькопроникних ділянок пласта; витіснення залишкового природного газу неуглеводневими газами і рідинами та їх сумішами [1-5].

Перспективним методом підвищення газовилучення з виснажених газових покладів є витіснення залишкового природного газу неуглеводневими газами, зокрема азотом.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Неуглеводневі гази і рідини все частіше застосовуються у нафтогазовій галузі. Їх, зокрема, використовують у промислових масштабах для підтримання пластового тиску в нафтових родовищах і як замітник буферного газу на підземних газосховищах. За результатами лабораторних досліджень витіснення неуглеводневими газами залишкового природного газу з однорідних і неоднорідних (двопластових) моделей пористого середовища найвищими витіснювальними властивостями володіє діоксид вуглецю [6]; дещо гіршими, але досить високими витіснювальними властивостями характеризуються димові гази та азот. Використання діоксиду вуглецю для витіснення залишкового природного газу з виснажених газових покладів є проблематичним через високу корозійну активність і відсутність надійних джерел його отримання. Перспективнішим є використання азоту для підвищення газовилучення з виснажених покладів. Азот можна отримати з повітря у будь-якому нафтогазовидобувному районі за допомогою промислових установок.

Можливі такі варіанти нагнітання азоту у виснажений газовий поклад з метою підвищення ступеня вилучення залишкового природного газу: за різних значень поточного пластового тиску у покладах і різної тривалості періоду нагнітання азоту у поклад; з підтриманням постійним або змінним у часі пластового тиску під час нагнітання азоту у поклад; з продовженням експлуатації видобувних свердловин чи з їх зупинкою у процесі нагнітання азоту у поклад.

Згідно з результатами математичного моделювання процесу витіснення природного газу з виснаженого покладу неуглеводневим газом (діоксидом вуглецю) коефіцієнт газовилучення буде тим більший, чим за меншого пластового тиску здійснюється нагнітання в пласт неуглеводневого газу [7, 8]. У роботах [9-12] наведено результати теоретичних досліджень витіснення

залишкового природного газу азотом з гіпотетичних моделей виснаженого газового покладу квадратної і колової форм. За результатами досліджень встановлено оптимальні значення тиску початку нагнітання у поклад азоту, тривалості періоду нагнітання азоту і розміщення видобувних свердловин на площі газонасиченості, за яких досягається максимальне значення коефіцієнта газовилучення. Проте у відомих публікаціях відсутні дані про вплив на кінцевий коефіцієнт газовилучення по залишковому газу роботи і зупинки видобувних свердловин під час нагнітання азоту у поклад з різним періодом часу. Тому актуальним є проведення досліджень з оцінки технологічної ефективності роботи і зупинки видобувних свердловин під час нагнітання азоту з різним періодом часу у виснажений газовий поклад на коефіцієнт газовилучення та інші технологічні показники до розробки покладу.

Формулювання цілей статті

За результатами комп'ютерного дослідження процесу витіснення залишкового природного газу азотом із виснаженого газового покладу колової форми оцінити технологічну ефективність роботи і зупинки видобувних свердловин під час нагнітання азоту у поклад з різним періодом часу.

Методика дослідження

Для оцінки технологічної ефективності роботи і зупинки видобувних свердловин під час нагнітання азоту з різним періодом часу у виснажений газовий поклад виконано комп'ютерне дослідження за допомогою модуля композиційного моделювання GEM, який входить у програмний комплекс CMG (Computer Modelling Group). Дослідження виконано на прикладі гіпотетичного газового покладу колової форми з такими параметрами: радіус контуру газонасиченості – 3000 м, площа газонасиченості – $28,26 \cdot 10^6$ м², товщина пласта – 12 м, коефіцієнт відкритої пористості – 0,14, коефіцієнт початкової газонасиченості – 0,78, коефіцієнт проникності пласта – 0,2 мкм², глибина залягання продуктивного пласта (середня глибина свердловини) – 3200 м, початковий пластовий тиск – 33 МПа, пластова температура – 340 К, відносна густина газу – 0,6. Початкові запаси газу дорівнюють 11,695 млрд.м³.

Газовий поклад розробляють у режимі виснаження 12 видобувними свердловинами, які розміщені у вигляді колової батареї радіусом 1500 м. Свердловини експлуатують на режимі постійної депресії на пласт 0,02 МПа з початковим дебітом газу однієї свердловини 125 тис.м³/доб.

Після зниження пластового тиску на 90 % від початкового тиску здійснюють нагнітання у пласт азоту через 12 нагнітальних свердловин, які розміщені у вигляді батареї з радіусом 3000 м. Під час нагнітання азоту у пласт продовжували експлуатацію видобувних свердловин у першій серії досліджень, а в другій серії досліджень видобувні свердловини зупиняли.

Дослідження виконано для різної тривалості періоду нагнітання азоту (6, 12, 18, 24, 30, 36 місяців) при співвідношенні темпів нагнітання азоту і видобутку газу на момент початку нагнітання азоту у пластових умовах 1:1. У кожному варіанті нагнітання азоту у пласт фіксували час прориву азоту у видобувні свердловини. Розрахунки проводили до моменту досягнення вмісту азоту у свердловинній продукції 5 % об.

Результати дослідження

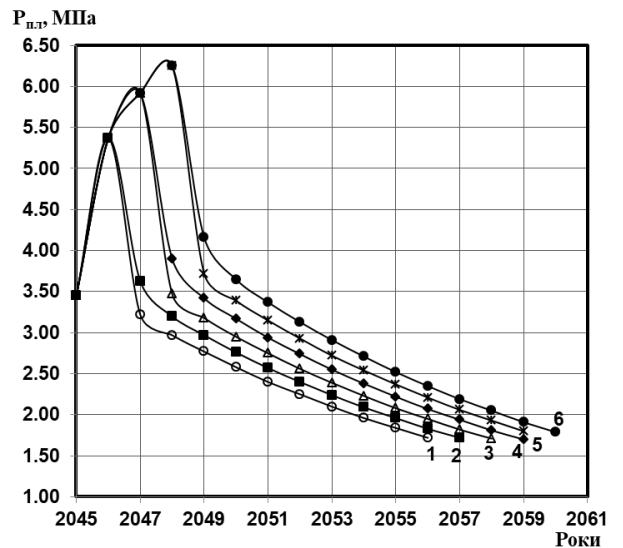
Розрахунки технологічних показників розробки покладу виконували з кроком у часі – 1 рік. Для кожного моменту часу визначали пластовий тиск, дебіт видобувної свердловини за газом та азотом, вміст азоту у свердловинній продукції і розраховували коефіцієнт газовилучення по залишковому газу. За результатами розрахунків будували відповідні графічні залежності.

Газовий поклад почали розробляти 01.01.2016 р., а нагнітання азоту у поклад розпочали 01.09.2045 р. На момент початку нагнітання азоту пластовий тиск у покладі знизився з початкового значення 33 МПа до 3.3 МПа, що відповідає 0,1 початкового тиску. При цьому поточний коефіцієнт газовилучення дорівнював 81,82 %. Отже, у покладі залишилося 18,18 % газу від початкових запасів.

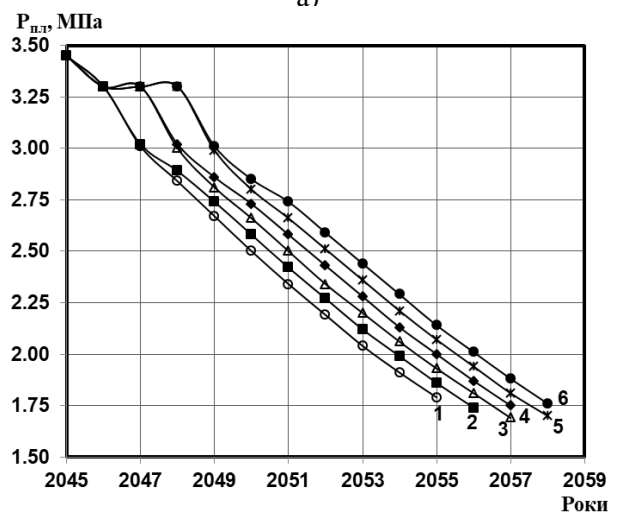
На рисунку 1 зображено залежності зміни в часі пластового тиску у виснаженому газовому покладі колової форми при зупинці (рисунки 1а) і роботі (рисунки 1б) видобувних свердловин під час нагнітання азоту у поклад з різним періодом часу. Під час зупинки видобувних свердловин (рисунки 1а), пластовий тиск поступово зростає, а після припинення нагнітання азоту – різко зменшується і в подальшому плавно спадає. Максимальне значення пластового тиску буде тим більшим, чим більша тривалість періоду нагнітання азоту у поклад. За тривалості періоду нагнітання азоту у поклад 36 місяців пластовий тиск зростає у 1,96 разів. У процесі подальшої розробки покладу після припинення нагнітання азоту у пласт пластовий тиск постійно підтримується вищим за більшої тривалості періоду нагнітання азоту. Підвищене значення пластового тиску сприятиме збільшенню дебітів свердловин, а також устьового тиску, що покращить умови подачі газу споживачеві.

Під час постійної роботи видобувних свердловин (рисунки 1б) пластовий тиск у процесі нагнітання азоту у поклад підтримується постійним, а після припинення нагнітання азоту поступово знижується.

На момент прориву азоту у видобувні свердловини і вмісту у свердловинній продукції 5 % об. азоту пластовий тиск буде тим більшим, чим більша тривалість періоду нагнітання азоту у поклад (рисунки 2). Значення пластового тиску залежить від роботи чи зупинки видобувних свердловин під час нагнітання азоту у поклад. На вказані моменти часу пластовий тиск вищий при зупинці видобувних свердловин



а)



б)

1 – 6 місяців; 2 – 12 місяців; 3 – 18 місяців; 4 – 24 місяці; 5 – 30 місяців; 6 – 36 місяців

Рисунки 1 – Залежності зміни у часі пластового тиску у виснаженому газовому покладі при зупинці (а) і роботі (б) видобувних свердловин під час нагнітання азоту у поклад з різним періодом часу

під час нагнітання азоту у поклад. Різниця між пластовими тисками при зупинці і роботі видобувних свердловин під час нагнітання азоту у поклад зростає із збільшенням тривалості періоду його нагнітання.

Час прориву азоту у видобувні свердловини залежить від тривалості періоду нагнітання його у газовий поклад та від роботи чи зупинки видобувних свердловин під час його нагнітання (рисунки 3). Час дорозробки покладу зменшується із збільшенням тривалості періоду нагнітання азоту у пласт і більший при зупинці видобувних свердловин під час нагнітання азоту у пласт порівняно з їх роботою. Різниця між часом дорозробки покладу при зупинці і роботі видобувних свердловин під час нагнітання азоту у пласт зростає із збільшенням тривалості періоду його нагнітання. Так, за тривалості періоду нагнітання азоту у поклад 6 місяців час

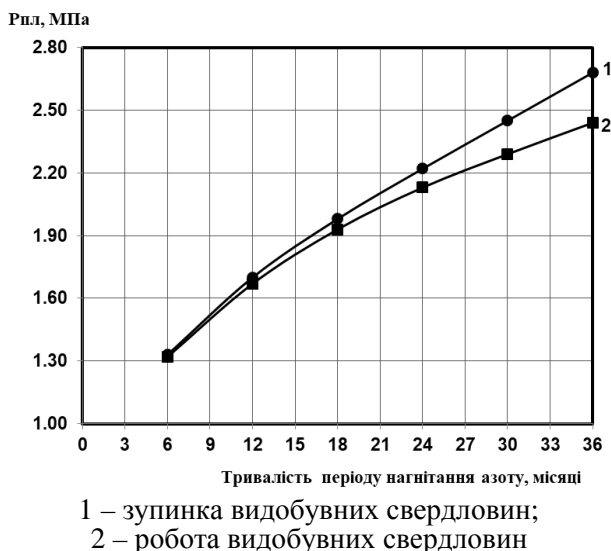


Рисунок 2 – Залежності пластового тиску від тривалості періоду нагнітання азоту у поклад при зупинці (1) та роботі (2) видобувних свердловин під час нагнітання азоту на момент прориву азоту у видобувні свердловини

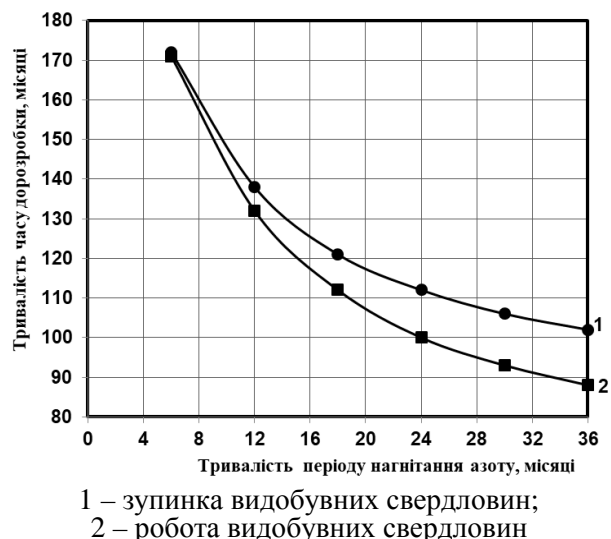


Рисунок 3 – Залежність часу дорозробки газового покладу від тривалості періоду нагнітання азоту при зупинці (1) та роботі (2) видобувних свердловин під час нагнітання азоту на момент прориву азоту у видобувні свердловини

дорозробки покладу при зупинці і роботі видобувних свердловин становить відповідно 172 і 171 місяці, а за тривалості періоду нагнітання азоту 36 місяців – 102 і 88 місяців.

Коефіцієнт газовилучення по залишковому газу залежить від тривалості періоду нагнітання азоту у поклад та роботи чи зупинки видобувних свердловин під час нагнітання азоту (рисунок 4). На момент прориву азоту у видобувні свердловини і за вмісту азоту у свердловинній продукції 5 % об. коефіцієнт газовилучення зменшується із збільшенням тривалості періоду нагнітання азоту у поклад і більший при роботі видобувних свердловин під час нагнітання азоту. Найбільший коефіцієнт газовилучення

отримано за тривалості періоду нагнітання азоту у поклад 6 місяців (47,68 % при роботі видобувних свердловин під час нагнітання азоту і 47,49 % – при зупинці видобувних свердловин).

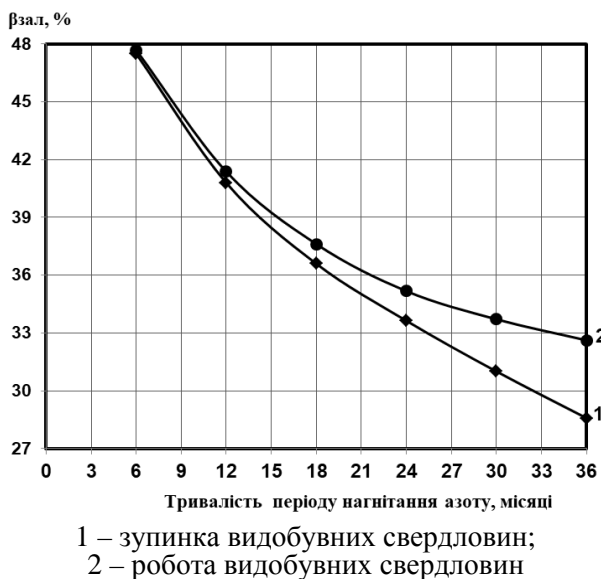


Рисунок 4 – Залежність коефіцієнта газовилучення по залишковому газу від тривалості періоду нагнітання азоту при зупинці (1) та роботі (2) видобувних свердловин під час нагнітання азоту на момент прориву азоту у видобувні свердловини

За тривалості періоду нагнітання азоту у поклад 36 місяців коефіцієнт газовилучення по залишковому газу становить 32,62 % при роботі видобувних свердловин під час нагнітання азоту у поклад і 28,58 % – при зупинці видобувних свердловин. Такий характер зміни коефіцієнта газовилучення пояснюється тим, що із збільшенням тривалості періоду нагнітання азоту у поклад і при зупинці видобувних свердловин під час нагнітання азоту зростає кінцевий пластовий тиск. За більшого кінцевого пластового тиску (за інших однакових умов) зростає кількість невилученого залишкового газу.

Значно вищі коефіцієнти газовилучення по залишковому газу отримано, якщо продовжити експлуатацію видобувних свердловин з моменту прориву в них азоту до вмісту азоту у свердловинній продукції 5 % об. Так, за тривалості періоду нагнітання азоту у поклад 18 місяців коефіцієнт газовилучення по залишковому газу зростає в таких межах: при зупинці видобувних свердловин під час нагнітання азоту – з 36,59 % на момент прориву азоту у видобувні свердловини – до 75,65 % за вмісту азоту у свердловинній продукції 5 % об., а при роботі видобувних свердловин – відповідно з 37,61 до 75,69 %. За тривалості періоду нагнітання азоту у поклад 36 місяців коефіцієнт газовилучення по залишковому газу зростає з 28,58 до 66,18 % – при зупинці видобувних свердловин і з 22,62 до 66,62 % – при роботі видобувних свердловин. Привертають увагу близькі за значенням коефіцієнти газовилучення по залишковому газу при роботі і зупинці видобувних свердловин,

отримані при 5 % об. вмісту азоту у видобувному газі. Різниця між ними не перевищує 1 %; більші значення коефіцієнта газовилучення по залишковому газу відповідають роботі видобувних свердловин під час нагнітання азоту у пласт.

Нагнітання азоту у поклад дозволяє отримати більші значення коефіцієнта газовилучення по залишковому газу, ніж при дорозробці покладу на виснаження без нагнітання азоту. Наприклад, для значення пластового тиску, яке відповідає тривалості періоду нагнітання азоту у поклад 18 місяців і вмісту азоту у видобувному газі 5 % об., коефіцієнт газовилучення по залишковому газу при дорозробці покладу на виснаження становив би 68,75 %, а при нагнітанні азоту у поклад і зупинці та роботі видобувних свердловин під час нагнітання азоту дорівнює відповідно 75,65 і 75,69 %.

Отже, зупинка видобувних свердловин під час нагнітання азоту у виснажений газовий поклад не призводить до збільшення кінцевого коефіцієнта газовилучення. При цьому зростає тривалість часу дорозробки покладу і в період зупинки свердловини газ не подається споживачеві, що може значно вплинути на техніко-економічні показники дорозробки покладу.

Висновки

За результатами математичного моделювання процесу витіснення залишкового природного газу азотом з виснаженого газового покладу оцінено вплив на показники дорозробки покладу роботи і зупинки видобувних свердловин під час нагнітання азоту у поклад з різним періодом часу. Встановлено, що при зупинці видобувних свердловин під час нагнітання азоту у поклад досягаються менші значення коефіцієнта газовилучення по залишковому газу, ніж при роботі видобувних свердловин і збільшується термін дорозробки покладу. Також у період зупинки видобувних свердловин газ не подається споживачеві. Тому зупинку видобувних свердловин під час нагнітання азоту у поклад не можна вважати доцільною.

Література

- 1 Закиров С.Н. Теория и проектирование разработки газовых и газоконденсатных месторождений : учебн. пос. для вузов / С.Н. Закиров. – М.: Недра, 1980. – 334 с.
- 2 Закиров С.Н. Разработка газовых, газоконденсатных и нефтегазоконденсатных месторождений : навч. посіб. / С.Н. Закиров. – М. : Струна, 1998. – 628 с.
- 3 Совершенствование технологии разработки месторождений нефти и газа / Под ред. С.Н. Закирова. – М.: Грааль, 2000. – 643 с.
- 4 Кондрат Р.М. Газоконденсатоотдача пластов / Р.М. Кондрат. – М.: Недра, 1992. – 255 с.
- 5 Бойко В.С. Довідник з нафтогазової справи / За заг. ред. докторів технічних наук В.С. Бойка, Р.М. Кондрата, Р.С. Яремійчука. – К. : Львів, 1996. – 620 с.

6 Oldenburg C.M. CO₂ Injection for Enhanced Gas Production and Carbon Sequestration / Oldenburg C.M., Benson S.M. // Proceedings of the SPE International Petroleum Conference and Exhibition. – 2002. – SPE 74367.

7 SPE 94129. CO₂ Injection for Enhanced Gas Recovery and Geo-Storage: Reservoir Simulation and Economics / A. Al-Hasami, S. R. Ren, B. Tohidi // Inst. of Petroleum Engineering, Heriot-Watt U.

8 SPE 130151. Enhanced Gas Recovery – Challenges shown at the example of three Gas Fields / Torsten Clemens, Severin Secklehner, Konstantinos Mantatzis, Bas Jacobs.

9 Кондрат Р.М. Дослідження процесу витіснення залишкового природного газу азотом із виснаженого газового родовища за різної тривалості періоду нагнітання азоту в пласт / Р.М. Кондрат, Л.І. Хайдарова // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2016. – № 1(58). – С. 60-67.

10 Кондрат Р.М. Дослідження впливу тиску початку нагнітання азоту у виснажене газове родовище на характеристики процесу вилучення залишкового природного газу / Р.М. Кондрат, Л.І. Хайдарова // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2016. – № 2(59). – С. 51-57.

11 Кондрат Р.М. Вплив розміщення видобувних свердловин на коефіцієнт газовилучення при периферійному нагнітанні азоту у виснажений газовий поклад кругової форми / Кондрат Р.М., Хайдарова Л.І. // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2017. – № 4(65). – С. 34-39.

12 Кондрат Р.М. Підвищення ступеня вилучення газу з виробленого газового родовища витісненням невідібраного природного газу азотом / Р.М. Кондрат, Л.І. Хайдарова // Науковий вісник національного гірничого університету. – 2017. – № 5. – С. 23-28.

Стаття надійшла до редакційної колегії
12.09.18

Рекомендована до друку
професором **Тарком Я.Б.**
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)
д-ром техн. наук **Акульшиним О.О.**
(ПАТ «Український нафтогазовий інститут»,
м. Київ)

Техніка і технології

УДК 622.692.4

DOI: 10.31471/1993-9973-2018-3(68)-12-18

РОЗРОБЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ БЕЗТРАНШЕЙНОЇ РЕКОНСТРУКЦІЇ ТРУБОПРОВІДНИХ КОМУНІКАЦІЙ ОЧИСНИМ ПОРШНЕМ

¹Я. В. Дорошенко, ²К. А. Поляруш, ¹В. Б. Запхляк

¹ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 42157,
e-mail: gnps@nimg.edu.ua

²ПАТ "Київенерго" СВП "Київські Теплові Мережі" РТМ "Печерськ";
01103, м. Київ, вул. Товарна, 1, тел. (044) 529-88-75,
e-mail: pubrel@kievenergo.com.ua

Обґрунтовано доцільність реконструкції трубопровідних комунікацій українських міст безтраншейними технологіями. Описано технологію безтраншейної реконструкції протягуванням поліетиленової труби меншого діаметра у зношений сталевий трубопровід – метод "труба в трубі". Наведено переваги цього методу. Здійснено аналіз можливостей існуючих тягових засобів для виконання таких робіт. Розроблено технологію безтраншейної реконструкції трубопровідних комунікацій протягуванням нового поліетиленового трубопроводу в зношений сталевий очисним поршнем. До очисного поршня штангою кріпиться ділянка нового поліетиленового трубопроводу. Поршень рухається під тиском повітря, яке подається в запоршневий простір компресором. Міжтрубний простір в робочому котловані герметизується ущільнювальною системою, яка хомутом або фланцем кріпиться до зношеного сталевого трубопроводу.

Виконано математичне моделювання процесу протягування трубопроводу очисним поршнем. Отримано залежності для розрахунку сил опору, які діють на рухому систему, а саме, сили механічного тертя манжет поршня до стінок сталевого трубопроводу, сили тертя поліетиленової труби до сталевий, сили тертя поліетиленової труби в манжетах ущільнювальної системи. Отримано залежності, які дають змогу розрахувати необхідний тиск в запоршневому просторі, щоб поршень протягнув новий поліетиленовий трубопровід усією довжиною реконструйованого горизонтального чи похилого зношеного сталевого трубопроводу. За розрахунковим тиском в запоршневому просторі підбирають обладнання для виконання робіт.

Ключові слова: компресор, поліетиленова труба, протягування, сила тертя, ущільнювальна система.

Обоснована целесообразность реконструкции трубопроводных коммуникаций украинских городов по бестраншейным технологиям. Описана технология бестраншейной реконструкции путем протягивания полиэтиленовой трубы меньшего диаметра сквозь трубу изношенного стального трубопровода – метод "труба в трубе". Приведены преимущества этого метода. Проанализированы возможности существующих тяговых средств при выполнении таких работ. Разработана технология бестраншейной реконструкции трубопроводных коммуникаций протягиванием нового полиэтиленового трубопровода в изношенный стальной при помощи очистительного поршня. К очистительному поршню при помощи штанги крепится участок нового полиэтиленового трубопровода. Поршень движется под давлением воздуха, подаваемого в запоршневое пространство компрессором. Межтрубное пространство в рабочем котловане герметизируется уплотнительной системой, которая при помощи хомута или фланца крепится к изношенному стальному трубопроводу.

Выполнено математическое моделирование процесса протягивания трубопровода при помощи очистительного поршня. Получены зависимости для расчета сил сопротивления, действующих на подвижную систему, а именно силы механического трения манжет поршня о стенки стального трубопровода, силы трения полиэтиленовой трубы о стальную, силы трения полиэтиленовой трубы в манжетах уплотнительной системы. Получены зависимости, позволяющие рассчитать необходимое давление в запоршневом пространстве, при котором поршень может протянуть новый полиэтиленовый трубопровод по всей длине реконструированного горизонтального или наклонного изношенного стального трубопровода. По расчетному давлению в запоршневом пространстве подбирают оборудование для выполнения работ.

The expediency of reconstruction of pipelines of Ukrainian cities with trenchless technologies is substantiated. The technology of trenchless reconstruction by extending a smaller diameter polyethylene pipe into a worn steel pipe is described – the method of "pipe in a pipe". The advantages of this method are presented. The analysis of possibilities of existing traction means for carrying out of such works is carried out. The technology of trenchless reconstruction of pipeline communications by developing a new polyethylene pipeline into a worn steel cleaning pig has been developed. A section of a new polyethylene pipeline is attached to the cleaning pig by a barbell. The pig moves under the pressure of air, which is fed into the cavity space by the compressor. The inter-tubular space in the working trench is sealed with a sealing system, which is clamped by a clamp or flange to a worn steel pipeline.

The mathematical modeling of the process by pipeline drainage with a cleaning pig is executed. Dependences were obtained for the calculation of the resistance forces acting on the moving system, namely, the mechanical friction forces of the pig cuff to the walls of the steel pipe, the friction forces of the polyethylene pipe to the steel, the friction force of the polyethylene pipe in the cuffs of the sealing system. Dependences are obtained which allow us to calculate the required pressure in the cavity space so that the pig has dragged a new polyethylene pipeline all along the length of the reconstructed horizontal or sloping worn steel pipeline. Under the design pressure in the cavernous space, equipment is selected to perform work

Keywords: compressor, polyethylene pipe, stretching, friction, sealing system.

Вступ. В більшості міст України трубопровідні комунікації зношені на 60-90 %. Є велика кількість ділянок трубопроводів, які відпрацювали свій ресурс у два-три рази. Локальний ремонт таких комунікацій є марною тратою часу і коштів. Проблема масштабної реконструкції трубопровідних комунікацій в більшості великих міст України вже давно перезріла,

свідченням чого є часті аварії, які призводять до втрати води з мереж тепло-, водопостачання, витоків природного газу з газових мереж, які можуть призводити до вибухів. Витоки води часто є причиною підняття рівня ґрунтових вод, що призводить до зсуву ґрунтів, руйнування будівель та споруд, розмивання ґрунту під автодорогами, наслідком якого є провалювання автомашин у вимиті порожнини (рис. 1, а). Нерідко наслідком аварій мереж теплопостачання є фонтани води в містах (рис. 1, б). Фактично старі комунікації міст є постійною загрозою життю і здоров'ю мешканців міст – "мінами уповільненої дії", час і місце вибуху яких невідомі. В містах, де стан комунікацій незадовільний, доцільним є уникання місць просідання асфальту автодоріг, асфальту, бруківки тротуарів.

На сьогодні реконструкція трубопровідних комунікацій в Україні виконується повільно і зазвичай траншейними технологіями, які є надзвичайно ресурсомісткими і пов'язані з виконанням великих обсягів земляних робіт з перекриванням доріг, руйнуванням дорожнього полотна та зеленої зони, порушенням інфраструктури, благоустрою міст. Це вимагає збільшення витрат на відновлювальні роботи, ускладнює дорожній рух, спричинює соціальний дискомфорт. В таких країнах, як Великобританія, Німеччина, Скандинавські країни, США 95 % від загального обсягу робіт з реконструкції трубопровідних комунікацій виконується безтраншейними технологіями.

Безтраншейні технології реконструкції трубопроводів з протягуванням нової труби чи рукава, виготовлених з полімерних матеріалів, у зношений металевий трубопровід є найефективнішим та найрентабельнішим методом вирішення проблеми відновлення

трубопровідних комунікацій. Перевагами безтраншейних технологій є:

- земляні роботи, зведені до мінімуму або взагалі відсутні;



а)



б)

а) провалювання автомашин у вимиті порожнину; б) фонтан води з водопроводу

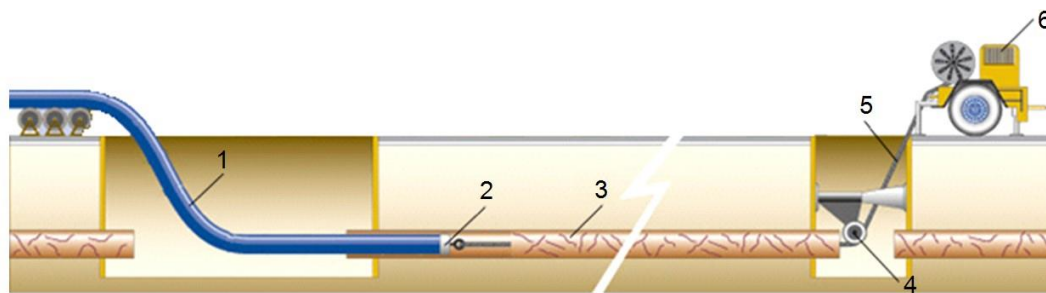
Рисунок 1 – Наслідки аварій мереж теплопостачання

- використання вже існуючого каналу для прокладання комунікацій;
- відсутній ризик пошкодження сусідніх комунікацій;
- немає потреби зупиняти дорожній рух та відновлювати дорожнє покриття у разі реконструкції трубопроводів під автомобільними дорогами;
- зменшення часу виконання робіт;

- практично не відбувається забруднення довкілля;
- вартість реконструкції в 2-3 рази менша порівняно з траншейною, а час виконання робіт

великий приймальний котлован, тож в ускладнених умовах цей метод застосувати надзвичайно складно.

Щоб усунути ці недоліки авторами



1 – новий поліетиленовий трубопровід; 2 – оголовок; 3 – зношений сталевий трубопровід; 4 – поворотний блок; 5 – тяговий трос; 6 – лебідка

Рисунок 2 – Схема протягування нового поліетиленового трубопроводу в зношений сталевий лебідкою, розміщеною на бровці приймального котловану

в 5-10 разів менший.

Безтраншейними технологіями реконструкції трубопровідних комунікацій займаються багато науковців, фірм. Одними з найактуальніших праць, присвячених безтраншейним технологіям, є [1-8].

Масштабність, висока вартість та жорсткі вимоги, які висуваються до ремонту та реконструкції трубопровідних комунікацій, вимагають вирішення складних науково-технічних задач, розроблення і впровадження ефективних, економічних безтраншейних технологій.

Одним з методів безтраншейної реконструкції трубопровідних комунікацій є протягування поліетиленової труби меншого діаметра в трубу зношеного сталевого трубопроводу – метод “труба в трубі” (рис. 2). Поліетиленовий трубопровід в дефектний сталевий протягують тяговими засобами, якими можуть бути:

- лебідки;
- гідродомкратні установки;
- трактори, бульдозери, інша колісна техніка;
- статична установка Grundoburst.

Для того, щоб протягнути поліетиленовий трубопровід тракторами, бульдозерами, тяговий трос виводять з приймального котловану, в який встановлюють систему поворотних блоків. Гідродомкратні установки, статичну установку Grundoburst розміщують в приймальному котловані.

Перед безтраншейною реконструкцією трубопроводів треба розробити приймальний котлован достатніх розмірів для розміщення тягових засобів або поворотних блоків, вирізати в ньому котушку труби та розмістити тягові засоби або поворотні блоки, прокласти в зношений сталевий трубопровід тяговий трос, очистити внутрішню порожнину зношеного трубопроводу протягуванням ним очисного поршня, ще раз прокласти тяговий трос, яким буде протягуватись новий поліетиленовий трубопровід. Все це вимагає багато часу і фінансових витрат. Також треба розробляти

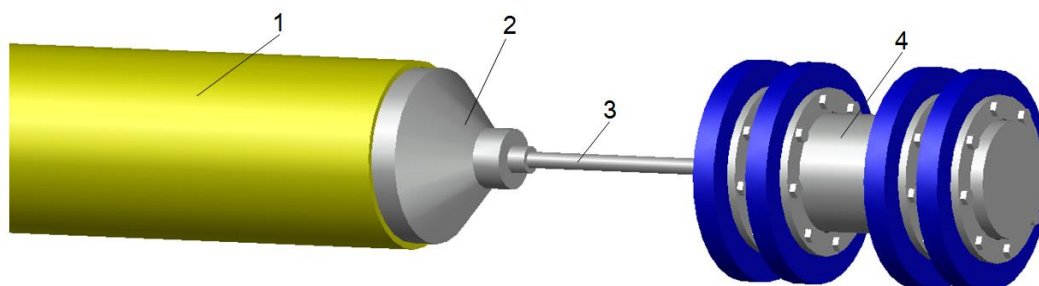
розроблено технологію протягування нового поліетиленового трубопроводу в зношений сталевий очисним поршнем. До очисного поршня 4 штангою 3 за оголовок 2 кріпиться ділянка нового поліетиленового трубопроводу 1 (рис. 3). Щоб очисний поршень рухався сталевим трубопроводом, в запоршневий простір треба подавати під тиском повітря. При цьому, щоб в запоршневому просторі підтримувався необхідний тиск, треба герметизувати простір між новим поліетиленовим трубопроводом та зношеним сталевим. Для цього розроблено ущільнювальну систему (рис. 4), яку в робочому котловані або колодязі фланцем чи хомутом 1 треба прикріпити до торця зношеного сталевого трубопроводу. Міжтрубний простір ущільнюється кільцевими гумовими ущільненнями 3, які затискаються фланцями 4. Кільцеві гумові ущільнення 3 повинні герметизувати міжтрубний простір і не випускати з нього повітря та забезпечити можливість протягування нового трубопроводу зношеним. Тому їх внутрішня частина повинна бути вигнута у бік протягування. Тоді під тиском повітря в міжтрубному просторі вони будуть притискатись до стінки протягуваного нового трубопроводу. Кількість гумових ущільнень 3 залежить від тиску в міжтрубному просторі. Повітря подається від компресора, який приєднують до патрубку 5. Тиск в міжтрубному просторі вимірюється манометром 6.

На монтажному майданчику біля робочого котловану до початку протягуваного поліетиленового трубопроводу кріплять оголовок 2 та тягу 3 (рис. 3). Тоді поліетиленовий трубопровід з оголовком проштовхують в ущільнювальну систему крізь кільцеві гумові ущільнення. Після цього до прикріпленого до оголовка тягової штанги кріплять поршень. Поршень і ущільнювальну систему з проштовхнутим в неї початком нового поліетиленового трубопроводу поміщають в робочий котлован.

В робочому котловані поршень запасовують у зношений сталевий трубопровід. Тоді до торця зношеного сталевого трубопроводу хомутом або фланцем кріплять ущільнювальну систему. До ущільнювальної системи приєднують компресор, яким починають закачувати повітря в простір між зношеним сталевим і новим поліетиленовим трубопроводом. Міжтрубним простором повітря надходить в запоршневий простір. Оскільки ущільнювальна система не випускає повітря з міжтрубного простору, то тиск за поршнем зростає. Поршень починає рухатись, зтягаючи за собою новий

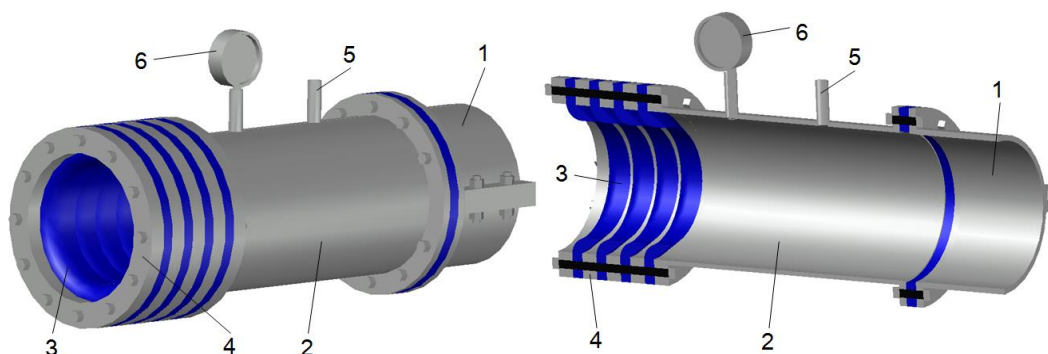
відбувається очищення внутрішньої порожнини зношеного сталевого трубопроводу очистним поршнем.

Для підбору компресора треба розрахувати, яким повинен бути тиск в запоршневому просторі, щоб поршень з прикріпленням до нього поліетиленовим трубопроводом рухався. Створення і реалізація математичної моделі руху твердих тіл трубопроводами під тиском є складною задачею. Динаміку руху поршнів трубопроводами досліджували Saeidbakhsh M. [9], Tolmasquim S. [10], Liqiong C. [11], Грудз В.Я. [12-16], Грудз Я.В. [14-17]. Дослідниками



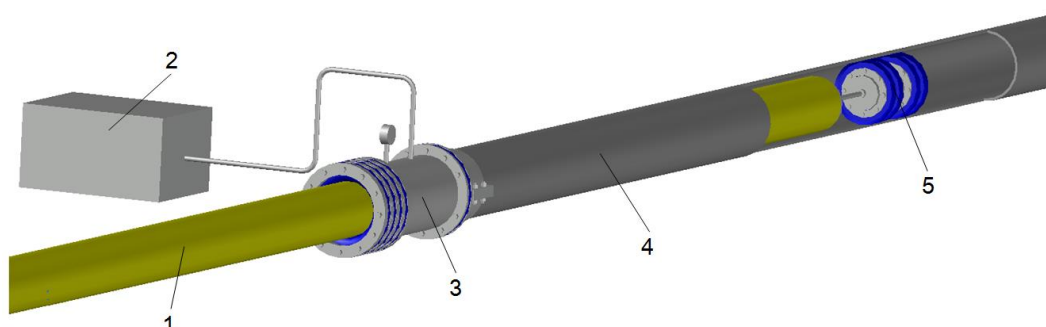
1 – поліетиленовий трубопровід; 2 – оголовок; 3 – тяга; 4 – очистний поршень

Рисунок 3 – Кріплення очистного поршня до протягнутого поліетиленового трубопроводу



1 – хомут; 2 – трубна катушка; 3 – гумові ущільнення; 4 – фланець; 5 – патрубок для приєднання компресора; 6 – манометр

Рисунок 4 – Ущільнювальна система



1 – протягнутий поліетиленовий трубопровід; 2 – компресор; 3 – ущільнювальна система; 4 – зношений сталевий трубопровід; 5 – поршень

Рисунок 5 – Протягування нового поліетиленового трубопроводу в зношений сталевий очистним поршнем

поліетиленовий трубопровід в зношений сталевий (рис. 5). Під час протягування необхідно вимірювати довжину зтягнутого в зношений сталевий трубопровід нового трубопроводу. Під час протягування

трубопроводного транспорту газу розроблено методи побудови математичних моделей руху поршня трубопроводом та загальні принципи їх реалізації. Однак досліджень динаміки руху поршня з прикріпленням до нього

поліетиленовим трубопроводом не виконувалось.

Складні фізичні процеси тертя манжет поршня та прикріпленого до нього поліетиленового трубопроводу до стінок сталевому трубопроводу і зміна в часі основних технологічних параметрів процесу призводять до громіздких співвідношень між цими параметрами, що вимагає емпіричних побудов відповідних залежностей. Особливо ускладнюється моделювання процесу руху поршня трубопроводом у місцях підвищень або понижень траси. В таких місцях, на поршень і прикріплений до нього поліетиленовий трубопровід діє змінна за величиною і напрямом сила тяжіння, яка має вплив на

$$\sum_{i=1}^n F_n = P \frac{\pi D_{e.c}^2}{4} - F_{T_{M.n}} - F_{T_{n.mp}} - F_{T_{y.c}}, \quad (2)$$

де $D_{e.c}$ – внутрішній діаметр сталевому трубопроводу.

У разі рівномірного руху поршня

$$\sum_{i=1}^n F_n = P \frac{\pi D_{e.c}^2}{4} - F_{T_{M.n}} - F_{T_{n.mp}} - F_{T_{y.c}} = 0. \quad (3)$$

Сила механічного тертя манжет поршня до стінок сталевому трубопроводу

$$F_{T_{M.n}} = n_{m.n} f_{m.n} F_H, \quad (4)$$

де $n_{m.n}$ – кількість манжет поршня;

$f_{m.n}$ – коефіцієнт тертя ковзання гумових манжет поршня до стінок сталевому

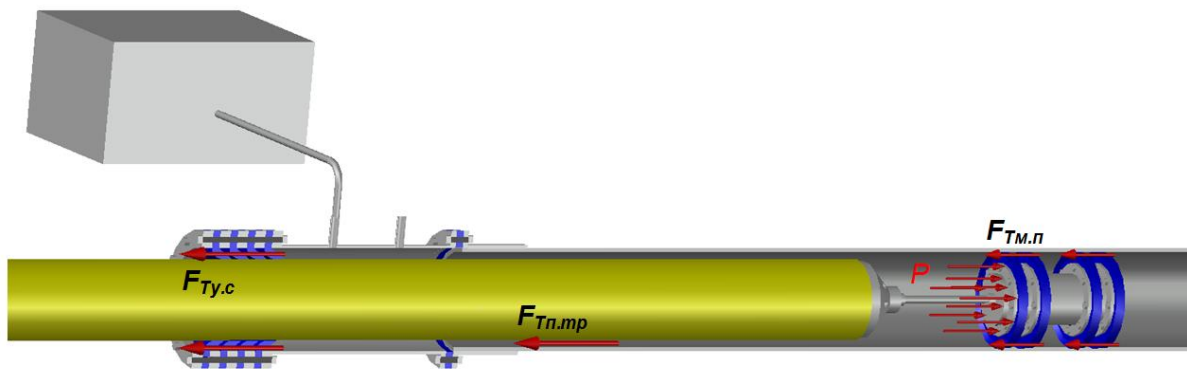


Рисунок 6 – Розрахункова схема протягування поліетиленового трубопроводу поршнем горизонтальною ділянкою трубопроводу

кінематику руху.

Рівнянням руху поршня з прикріпленим до нього поліетиленовим трубопроводом описується другим законом Ньютона

$$m_n \frac{dV_n}{dt} = \sum_{i=1}^n F_n, \quad (1)$$

де m_n – маса поршня;

V_n – швидкість руху поршня;

t – час;

$\sum_{i=1}^n F_n$ – сума сил, які діють на рухому систему.

Поршень з прикріпленим до нього поліетиленовим трубопроводом рухається під дією сили, яка спричинена тиском повітря P , що подається від компресора. До сил опору, які діють на рухому систему на горизонтальних ділянках траси, відноситься сила механічного тертя манжет поршня до стінок сталевому трубопроводу $F_{T_{M.n}}$, сила тертя поліетиленової труби до сталевій $F_{T_{n.mp}}$, сила тертя поліетиленової труби в манжетах ущільнювальної системи $F_{T_{y.c}}$ (рис. 6). Тоді сума сил, які діють на рухому систему, буде рівна

трубопроводу залежить від швидкості руху ковзаючої пари (зменшується зі збільшенням швидкості), чистоти поверхні, її площі, сили притискання манжет до стінок трубопроводу, типу каучуку і знаходиться в діапазоні 0,5...0,7; F_H – сила реакції.

Сила реакції F_H – це сила, яка виникає, коли гумові манжети поршня притискаються до стінки сталевому трубопроводу. Для розрахунку сили реакції запишемо закон Гука, за яким напруження, що виникають в манжетах поршня, рівні

$$\sigma = \varepsilon E, \quad (5)$$

де ε – відносна деформація манжет поршня;

E – модуль пружності гуми ($E = 2 \text{ МПа}$).

Відносна деформація манжет поршня

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}, \quad (6)$$

де L – радіус манжет поршня ($L = D_{m.n} / 2$, $D_{m.n}$ – діаметр манжет поршня до його запусання в трубопровід);

ΔL – абсолютне стиснення манжет поршня, яке рівне

$$\Delta L = \frac{D_{m.n} - D_{e.c}}{2}. \quad (7)$$

Також відомо, що напруження, які виникають в манжетах поршня, рівні

$$\sigma = \frac{F_H}{S}, \quad (8)$$

де S – площа поперечного перерізу манжети поршня у напрямку дії сили

$$S = D_{в.с} h_m, \quad (9)$$

де h_m – товщина манжети поршня.

Тоді, підставивши (5), (6), (7) і (9) в (8), отримаємо

$$F_H = E h_m D_{в.с} \frac{D_{м.н} - D_{в.с}}{D_{м.н}}. \quad (10)$$

Підставивши (10) в (4), отримаємо формулу для розрахунку сили механічного тертя манжет поршня до стінок сталевго трубопроводу

$$F_{Тм.н} = n_{м.н} f_{м.н} E h_m D_{в.с} \frac{D_{м.н} - D_{в.с}}{D_{м.н}}. \quad (11)$$

Сила тертя поліетиленової труби до сталевгої –

$$F_{Ту.с} = n_{м.у.с} \pi D_{з.н} B P_k f_{у.с}, \quad (14)$$

де $n_{м.у.с}$ – кількість манжет в ущільнювальній системі;

B – ширина контакту манжети з поліетиленовим трубопроводом;

P_k – контактний тиск, який виникає під час монтажу манжет, МПа ($P_k = 0,2 \dots 0,5$ МПа);

$f_{у.с}$ – коефіцієнт тертя поліетилену до гуми ($f_{у.с} = 0,1 \dots 0,13$).

Підставивши (11), (12), (14) в (3) отримаємо:

$$P \frac{\pi D_{в.с}^2}{4} - n_{м.н} f_{м.н} E h_m D_{в.с} \frac{D_{м.н} - D_{в.с}}{D_{м.н}} - \quad (15)$$

$$- f_{н.мп} q_{н.мп} L_{н.мп} - n_{м.у.с} \pi D_{з.н} B P_k f_{у.с} = 0.$$

Звідси необхідний тиск в запоршневому просторі, щоб поршень з прикріпленим до нього поліетиленовим трубопроводом рухався горизонтальним трубопроводом становить

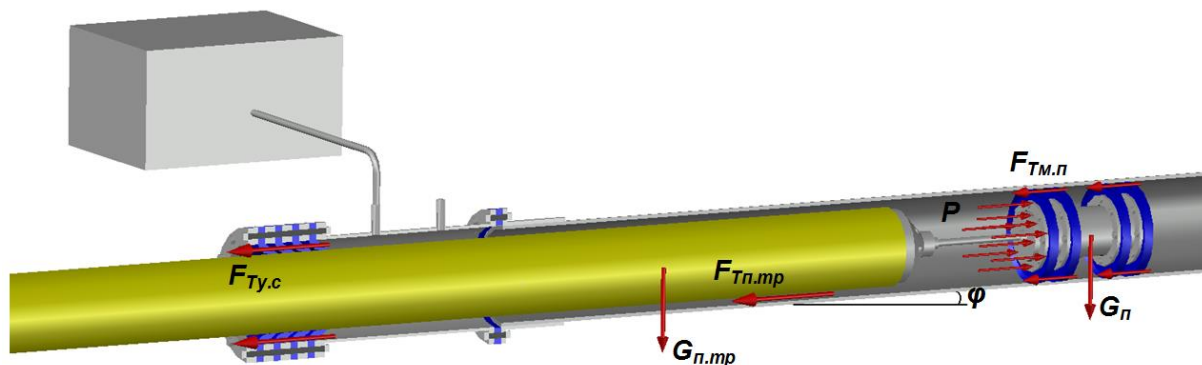


Рисунок 7 – Розрахункова схема протягування поліетиленового трубопроводу поршнем похилою ділянкою трубопроводу

$$F_{Тн.мп} = f_{н.мп} q_{н.мп} L_{н.мп}, \quad (12)$$

де $f_{н.мп}$ – коефіцієнт тертя ковзання поліетилену до сталі (знаходиться в діапазоні $0,1 \dots 0,2$);

$q_{н.мп}$ – рівномірно розподілене навантаження від власної ваги поліетиленового трубопроводу;

$L_{н.мп}$ – довжина поліетиленової труби.

Рівномірно розподілене навантаження від власної ваги поліетиленового трубопроводу

$$q_{н.мп} = n_{в.с} g \rho_n \frac{\pi (D_{з.н}^2 - D_{в.н}^2)}{4}, \quad (13)$$

де $n_{в.с}$ – коефіцієнт надійності за навантаженням від власної ваги, $n_{в.с} = 1,1$;

ρ_n – густина поліетилену;

$D_{з.н}$ – зовнішній діаметр поліетиленової труби;

$D_{в.н}$ – внутрішній діаметр поліетиленової труби.

Сила тертя поліетиленової труби в манжетах ущільнювальної системи –

$$P = \left\{ 4 \left(n_{м.н} f_{м.н} E h_m D_{в.с} \frac{D_{м.н} - D_{в.с}}{D_{м.н}} + \right. \quad (16)$$

$$\left. + f_{н.мп} q_{н.мп} L_{н.мп} + n_{м.у.с} \pi D_{з.н} B P_k f_{у.с} \right\} \times \left\{ \pi D_{в.с}^2 \right\}^{-1}.$$

На похилих ділянках траси на поршень і прикріплений до нього поліетиленовий трубопровід діють значні гравітаційні сили (рис. 7). Причому, якщо на висхідних ділянках траси сила тяжіння спричиняє опір рухові поршню і прикріпленому до нього поліетиленовому трубопроводу – тобто є гальмівною силою – то на низхідних ділянках сила тяжіння є рухомою силою.

На похилих ділянках траси рівняння (3) матиме вигляд

$$\sum_{i=1}^n F_n = P \frac{\pi D_{в.с}^2}{4} - F_{Тм.н} - F_{Тн.мп} - F_{Ту.с} - \quad (17)$$

$$- G_n \sin \phi - G_{н.мп} \sin \phi = 0,$$

де G_n – сила тяжіння поршня;

$G_{н.мп}$ – сила тяжіння поліетиленового трубопроводу;

φ – кут нахилу сталевому трубопроводу до горизонту.

Сила тяжіння поршня

$$G_n = m_n g \sin \varphi, \quad (18)$$

де m_n – маса поршня;

m_n – маса поршня

Сила тяжіння поліетиленового трубопроводу

$$G_{n.mp} = q_{n.mp} L_{n.mp} \sin \varphi. \quad (19)$$

Звідси необхідний тиск в запоршневому просторі на похилих висхідних ділянках траси –

$$P = \left\{ 4 \left(n_{m,n} f_{m,n} E h_m D_{в.с} \frac{D_{м.н} - D_{в.с}}{D_{м.н}} + f_{n.mp} q_{n.mp} L_{n.mp} + n_{m,y.c} \pi D_{з.н} B P_{к} f_{y.c} + m_n g \sin \varphi + q_{n.mp} L_{n.mp} \sin \varphi \right) \times \left\{ \pi D_{в.с}^2 \right\}^{-1} \right\}. \quad (20)$$

Висновки. Переваги безтраншейних технологій реконструкції трубопроводних комунікацій є очевидними і полягають в тому, що капітальні витрати знижуються всередньому на 40-50%, а продуктивність робіт збільшується в рази, що дає змогу підвищити темпи виконання робіт.

Розроблено технологію безтраншейної реконструкції трубопроводних комунікацій протягуванням нового поліетиленового трубопроводу в зношений сталевий очисним поршнем, який рухається під тиском повітря, що подається компресором в запоршневий простір. Запоршневий простір герметизований ущільнювальною системою в робочому котловані. Технічним результатом застосування розробленої технології є зменшення часу робочого процесу, зменшення обсягу земляних робіт, спрощення процесу протягування нового трубопроводу, зменшення витрат на реконструкцію та підготовчі роботи, забезпечення можливості застосування в ускладнених міських умовах. Виведено залежності, які дають змогу розрахувати необхідний тиск у запоршневому просторі, щоб поршень протягнув новий поліетиленовий трубопровід усією довжиною реконструйованого горизонтального чи похилого сталевому трубопроводу. За розрахованим значенням тиску в запоршневому просторі підбирають компресор для виконання робіт.

Література

1 McKim A. R. Selection method for trenchless technologies [Text] / A. R. McKim // Journal of Infrastructure Systems, ASCE. – 1997. – vol. 3. – no. 3. – Pp. 119-125.

2 Allouche E. State-of-the-Art Review of No-Dig Technologies for New Installations [Text] / E. Allouche, S. Ariaratnam // Proceedings, Pipeline, ASCE Conference. – Reston. – 2002.

3 Catha S. An innovative new technology for trenchless rehabilitation of high pressure gas (liquid) transmission pipelines [Text] / S. Catha, R. Burke, M. Kanninen // Pipeline Technology Conference. – 2008.

4 Lueke S. J. Rehabilitation of underground infrastructure utilizing trenchless pipe replacement [Text] / S. J. Lueke, T. S. Ariaratnam // Practice Periodical on Structural Design and Construction, ASCE. – 2001. – vol. 6. – no. 1. – Pp. 25-34.

5 Elzink W. Lining with Plastics Pipes – Experiences from Europe [Text] / W. Elzink, J. Schuurmans // Trenchless Asia, ISTT Conference. – Singapore. – 1995.

6 Janflen A. Importance of lateral structural repair of lateral lines simultaneously with main line CIPP rehabilitation [Text] / A. Janflen // NO-DIG Sao Paulo (Brasil). – 2012.

7 Kutz G. E. Predicting I/I Reduction for Planning Sewer Rehabilitation [Text] / G. E. Kutz // Trenchless Pipeline Projects: Practical Applications. – New York: ASCE. – 1997. – Pp. 103-110.

8 Zwierzchowska A. Technologie bezwykopowej budowy sieci gazowych, wodociagowych i kanalizacyjnych [Text] / A. Zwierzchowska // Politechnika swietokrzyska. – Kielce, 2006. – 180 p.

9 Saeidbakhsh M. Dynamic analysis of small pigs in space pipelines [Text] / M. Saeidbakhsh, M. Rafeeyan, S. Ziaei-Rad // Oil & Gas Science and Technology. – 2009. – Vol. 64. – No 2. – Pp. 155-164.

10 Tolmasquim S. Design and control of pig operations through pipelines [Text] / S. Tolmasquim, A. Nieckele // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2008. – Vol. 62. – No 3. – Pp. 102-110.

11 Liqiong C. Numerical study of being forced leather cap type pig in straight gas pipeline [Text] / C. Liqiong, Y. Li, X. Chen, Y. Zhan, M. Dang // Open Civil Engineering Journal. – 2016. – No 10. – Pp. 141-148.

12 Грудз В. Я. Керування режимом роботи газопроводу в період проведення профілактичних очищень [Текст] / В. Я. Грудз, В. Б. Михалків, В. В. Розгонюк, В. П. Рудко // Нафт. і газ. пром-сть. – 1998. – № 6. – С. 37-38.

13 Грудз В. Я. Аналітичні дослідження впливу профілю траси газопроводу на динаміку руху інтелектуальних поршнів [Текст] / В. Я. Грудз, В. Б. Михалків, В. В. Розгонюк, В. П. Рудко // Нафт. і газ. пром-сть. – 1999. – № 1. – С. 44-46.

14 Грудз В. Я. Математичне моделювання процесу руху інтелектуального поршня по газопроводу [Текст] / В. Я. Грудз, В. В. Бакаєв, Я. В. Грудз, Г. Розен // Нафтова і газова промисловість. – 2000. – №1. – С.46-47.

15 Грудз В. Я. Регулювання руху інтелектуального поршня зміною технологічної схеми лінійної ділянки / Грудз В. Я., Бакаєв В. В., Грудз Я. В., Розен Г. // Нафтова і газова промисловість. – 2001. – №1. – С.44-45.

16 Грудз В. Я. Регулювання руху інтелектуального поршня зміною технологічної схеми лінійної ділянки / В. Я. Грудз, В. В.

Бакаєв,
Я. В. Грудз, Г. Розен // Нафт. і газ. пром-сть. –
2001. – № 1. – С. 44-45.

17 Грудз Я. В. Розробка методів
регулювання режиму роботи газопроводів в
процесі їх діагностування інтелектуальними
поршнями: дис. канд. техн. наук : спец. 05.15.13
"Нафтогазопроводи, бази та сховища": Дата
захисту 23.01.02 / Я. В. Грудз. – Івано-
Франківськ, 2001. – 126 с.

Стаття надійшла до редакційної колегії

21.09.18

Рекомендована до друку
професором Грудзом В.Я.
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)
канд. техн. наук Костівим В.В.
(УМГ «Прикарпаттрансгаз»,
м. Івано-Франківськ)

Дослідження та методи аналізу

УДК 622.276

DOI: 10.31471/1993-9973-2018-3(68)-19-26

ОСОБЛИВОСТІ ТЕЧІЇ РОЗЧИНУ ПОЛІМЕРУ В ТРИЩИНУВАТО-ПОРИСТОМУ КОЛЕКТОРІ

А. В. Погребняк, І. В. Перкун, В. Г. Погребняк

ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. +38 050 1351545,
e-mail: pogrebnyak.av@gmail.com, perkuniv@gmail.com, vgpogrebnyak@gmail.com

Наведено результати чисельного моделювання течії простої і в'язкопружної (розчину полімеру) рідин крізь тріщину з використанням розчинів полімерів для підвищення нафтовилучення з пласта. Встановлені особливості поведінки в'язкопружної рідини при течії з повздовжнім градієнтом швидкості і прояву при цьому ефектів пружних деформацій мають визначальне значення в розумінні механізму «аномально» високого підвищення нафтовилучення з пластів шляхом використання водополімерного заводнення тріщинувато-пористих колекторів. Розуміння природи збільшення нафтовилучення з пластів при використанні розчинів полімерів дозволить розробити рекомендації щодо вибору режимів водополімерного заводнення тріщинувато-пористих колекторів.

Ключові слова: розчин полімеру, ефекти пружних деформацій, гідродинамічне поле, градієнт швидкості, тріщина, колектор, нафтовилучення.

Приведены результаты численного моделирования течения простой и вязкоупругой (раствора полимера) жидкостей сквозь трещину при использовании растворов полимеров для повышения нефтеотдачи пластов. Установленные закономерности поведения вязкоупругой (раствора полимера) жидкости при течении с продольным градиентом скорости и проявляющиеся при этом эффекты упругих деформаций имеют определяющее значение в понимании механизма «аномально» высокой нефтевытесняющей способности водно-полимерного раствора. Понимание природы увеличения нефтеотдачи пластов с применением растворов полимеров позволит разработать рекомендации по выбору режимов воднополимерного заводнения трещино-пористых коллекторов.

Ключевые слова: раствор полимера, эффекты упругих деформаций, гидродинамическое поле, градиент скорости, трещина, коллектор, нефтеотдача.

This article presents the results of numerical flow simulation of simple and viscoelastic (polymer solution) fluids through a crack by using polymer solutions for enhanced oil recovery from the reservoir. The determined regularities of viscoelastic (polymer solution) liquid behavior with longitudinal velocity gradient and manifested in this case elastic deformations effects have a decisive meaning in the understanding of the mechanism "anomalously" high oil recovery ability from the reservoir by using water-polymer flooding of the porous-fractured reservoir. Understanding the nature of increased oil recovery with the use of polymer solutions will lead to the development of recommendations on the choice of regimes of water-polymer flooding of the porous-fractured reservoir.

Keywords: polymer solution, elastic deformation effects, hydrodynamic field, velocity gradient, crack, reservoir, oil recovery.

Вступ

Одна із основних проблем, яку необхідно вирішувати під час розробляння технології підвищення нафтовилучення з пластів шляхом використання розчинів полімерів, – визначення оптимального режиму течії в тріщинувато-

пористому колекторі. Технологічні показники при використанні розчинів полімерів для підвищення нафтовилучення з пласта розраховують, виходячи з умови задоволення нерівності

$$\dot{\epsilon}\theta_c \geq D_{екр}, \quad (1)$$

де θ_c – час релаксації полімерного розчину,

$\dot{\epsilon}$ – повздовжній градієнт швидкості.

Вираз (1) є критерієм переходу макромолекулярного клубка з гідродинамічно непронижного "сегментального гелю", де значна частина сегментів заекранована, в протічний "сегментальний розчин", в якому вже всі сегменти гідродинамічно взаємодіють з розчинником. При виконанні введеної нерівності в розчинах полімерів (поліетиленоксиду, поліакриламід у та ін.) при течії з повздовжнім градієнтом швидкості формуються динамічні надмолекулярні структури [1-3]. Вираз (1) слід трактувати як число Дебори, тому що зворотна величина повздовжнього градієнта швидкості це не що інше, як часовий масштаб течії [4]. Таким чином, розрахунок зводиться до визначення часу релаксації (характерного часу полімерного розчину) і повздовжнього градієнту швидкості, який реалізується під час течії полімерного розчину в тріщинувато-пористому колекторі.

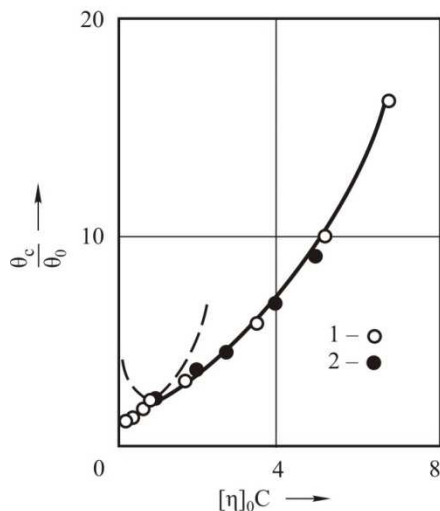
Характерний час релаксації, наприклад, для водного розчину поліетиленоксиду (ПЕО) (в'язкопружної рідини) визначається з отриманого нами наступного виразу

$$\theta_c = \begin{cases} \theta_0 e^k & \text{при } k < 1 \\ \theta_0 \frac{e^{k^{2/3}}}{k^{1/3}} & \text{при } k > 1 \end{cases}, \quad (2)$$

де $[\eta]_0$ – характеристична в'язкість,

C – концентрація полімеру в розчині, а

$[\eta]_0 \cdot C = k$. Залежність $\frac{\theta_c}{\theta_0}$ від $[\eta]_0 \cdot C$ для ПЕО 2-х молекулярних мас у воді відображена на рис. 1.



$M_{PEO} : 1 - 4 \cdot 10^6, 2 - 2,5 \cdot 10^6$

Рисунок 1 – Залежність $\frac{\theta_c}{\theta_0}$ від концентрації ПЕО у розчині

Суцільною лінією показаний хід залежності, отриманої за виразом (2). Видно, що експериментальні точки для відповідних концентраційних областей задовільно лягають на розра-

хункову криву. Таким чином, підставляючи відомі молекулярні характеристики полімеру до виразу (2), можна обчислити час релаксації розчинів полімерів. Вплив температури у цьому виразі враховується температурною залежністю θ_0 і k .

Слід зазначити, що на сьогодні в літературі відсутні аналітичні вирази, за допомогою яких можна було б розрахувати повздовжній градієнт швидкості при втіканні розчину полімеру в тріщину. Для визначення повздовжнього градієнта швидкості у вхідній області тріщини під час течії розчину полімеру в тріщинувато-пористому колекторі необхідно провести аналіз особливостей течії розчинів полімерів крізь тріщину в нафтовому колекторі з урахуванням їх в'язкопружних властивостей.

Постановка задачі

Відомо, що розчини полімерів володіють в'язкопружними властивостями. Тому, для оцінки деформаційних характеристик (функцій течії, розподілів повздовжнього градієнта швидкості і нормального напруження) потоку, що призводять до прояву аномальних (у порівнянні з поведінкою ньютонівської рідини) ефектів, можна вибрати добре знану максвеллівську модель в'язкопружної рідини [5-10] з використанням оператора Яумана [11]. Вибір цієї моделі був обумовлений тим, що згідно з Лоджем [10] дослідження непрямолінійних, несталих, з точки зору Лагранжа, течій в'язкопружних рідин не додає якої-небудь нової інформації до вже отриманої при вивченні однорідних або квазіоднорідних зсувних деформацій. На його думку, "... єдина причина детальних розрахунків різних типів непрямолінійних течій – переконатися у їх практичній реалізації". Це твердження Лоджа можна інтерпретувати таким чином, що для опису збіжних потоків (у вхідній області тріщини) не слід придумувати нові рівняння реологічного стану – досить скористатися отриманими при вивченні куєттівської течії або, принаймні, визначити, чи не можуть вони пояснити особливості збіжної течії в тріщинувато-пористому колекторі (у вхідній області тріщини).

Алгоритм числового розв'язання завдання

Усталені течії нестискуваних середовищ описуються такими рівняннями:

– рівнянням нерозривності

$$v_{,i}^i = 0, \quad (3)$$

– рівнянням руху Коші

$$\rho v^k v_{,k}^i = -g^{ik} P_{,k} + T_{,k}^{ij}, \quad (4)$$

де g^{ik} – метричний тензор, а $T_{,k}^{ij}$ визначається при коваріантному диференціюванні T^{ij} :

$$T_{,k}^{ij} = \frac{\partial T^{ij}}{\partial x^k} + \left\{ \begin{matrix} i \\ k \ m \end{matrix} \right\} T^{mj} + \left\{ \begin{matrix} j \\ k \ m \end{matrix} \right\} T^{im},$$

де $\left\{ \begin{matrix} i \\ k \ m \end{matrix} \right\}$ є трикомпонентним символом Кристоффеля і виражається залежністю:

$$\left\{ \begin{matrix} i \\ k \ m \end{matrix} \right\} = \frac{1}{2} g^{i\ell} \left(\frac{\partial g_{k\ell}}{\partial x^m} + \frac{\partial g_{m\ell}}{\partial x^k} - \frac{\partial g_{km}}{\partial x^\ell} \right).$$

Позначивши час релаксації через θ_c , а в'язкість через η_c , запишемо структурне рівняння реології моделі рідини Максвелла :

$$T^{ij} + \theta_c \frac{D_j T^{ij}}{Dt} = 2\eta_c D^{ij}, \quad (5)$$

де $\frac{D_j}{Dt}$ – похідна Яумана, яка описується рівнянням

$$\frac{D_j T^{ij}}{Dt} = \frac{\partial T^{ij}}{\partial t} + \mathcal{V}^k T^{ij}_{,k} - W_k^i T^{kj} - T^{ik} W_k^j,$$

у якому

$$D_{km} = \frac{1}{2} (\mathcal{V}_{k,m} + \mathcal{V}_{m,k}),$$

$$W_{km} = \frac{1}{2} (\mathcal{V}_{k,m} - \mathcal{V}_{m,k}).$$

Розглянемо випадок, коли нестискувана рідина рухається між двома паралельними площинами і витікає крізь тріщину, довжина якої значно перевищує її ширину. Течія плоска і стаціонарна. На рис. 2 показана форма тріщини у тріщинувато-пористому колекторі і декартові координати.

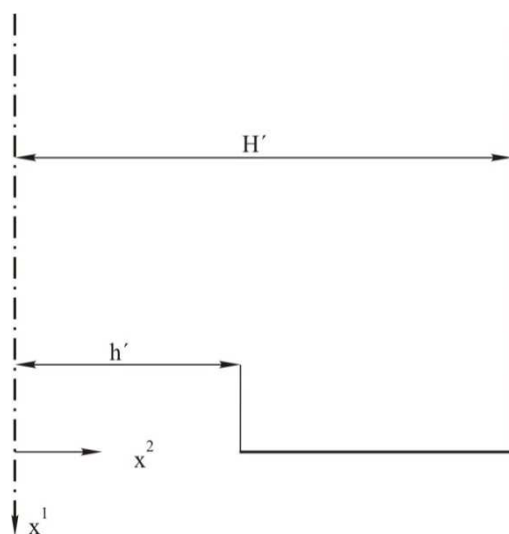


Рисунок 2 – Форма тріщини та декартові координати

Компоненти метричного тензора в декартових координатах мають вигляд:

$$g_{11} = g_{22} = 1,$$

$$g_{12} = g_{21} = 0.$$

Трикомпонентний символ Кристоффеля $\left\{ \begin{matrix} i \\ k \ m \end{matrix} \right\}$ дорівнює нулю, оскільки компоненти метричного тензора g_{ik} не залежать від координат.

Виразимо у безрозмірному вигляді і введемо в рівняння (3), (4) і (5) такі величини:

$$x_1^* = \frac{x^1}{H'}, \quad x_2^* = \frac{x^2}{H'},$$

$$V_1^* = \frac{\mathcal{V}^1}{\bar{u}}, \quad V_2^* = \frac{\mathcal{V}^2}{\bar{u}},$$

$$T_{11}^* = \frac{H'}{\eta_c \bar{u}} T^{11}, \quad T_{22}^* = \frac{H'}{\eta_c \bar{u}} T^{22},$$

$$T_{12}^* = \frac{H'}{\eta_c \bar{u}} T^{12}, \quad T_{21}^* = \frac{H'}{\eta_c \bar{u}} T^{21}, \quad (6)$$

$$P^* = \frac{H'}{\eta_c \bar{u}} P,$$

де \bar{u} – середня швидкість течії;
 $2H'$ – ширина тріщини.

З урахуванням перетворень (3), (4), (5) приводяться до вигляду

$$\frac{\partial \mathcal{V}_1^*}{\partial x_1^*} + \frac{\partial \mathcal{V}_2^*}{\partial x_2^*} = 0, \quad (7)$$

$$\text{Re} \left(\mathcal{V}_1^* \frac{\partial \mathcal{V}_1^*}{\partial x_1^*} + \mathcal{V}_2^* \frac{\partial \mathcal{V}_1^*}{\partial x_2^*} \right) = \quad (8,a)$$

$$= -\frac{\partial P^*}{\partial x_1^*} + \frac{\partial T_{11}^*}{\partial x_1^*} + \frac{\partial T_{12}^*}{\partial x_2^*},$$

$$\text{Re} \left(\mathcal{V}_1^* \frac{\partial \mathcal{V}_2^*}{\partial x_1^*} + \mathcal{V}_2^* \frac{\partial \mathcal{V}_2^*}{\partial x_2^*} \right) = \quad (8,b)$$

$$= -\frac{\partial P^*}{\partial x_2^*} + \frac{\partial T_{21}^*}{\partial x_1^*} + \frac{\partial T_{22}^*}{\partial x_2^*},$$

$$T_{11}^* + We \left\{ \mathcal{V}_1^* \frac{\partial T_{11}^*}{\partial x_1^*} + \mathcal{V}_2^* \frac{\partial T_{11}^*}{\partial x_2^*} - \quad (9,a)$$

$$- \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \mathcal{V}_1^*}{\partial x_2^*} - \frac{\partial \mathcal{V}_2^*}{\partial x_1^*} \right) \left(T_{12}^* + T_{21}^* \right) \right\} = 2 \frac{\partial \mathcal{V}_1^*}{\partial x_1^*},$$

$$T_{22}^* + We \left\{ \mathcal{V}_1^* \frac{\partial T_{22}^*}{\partial x_1^*} + \mathcal{V}_2^* \frac{\partial T_{22}^*}{\partial x_2^*} + \quad (9,b)$$

$$+ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \mathcal{V}_1^*}{\partial x_2^*} - \frac{\partial \mathcal{V}_2^*}{\partial x_1^*} \right) \left(T_{12}^* + T_{21}^* \right) \right\} = 2 \frac{\partial \mathcal{V}_2^*}{\partial x_2^*},$$

$$T_{12}^* + We \left\{ \mathcal{V}_1^* \frac{\partial T_{12}^*}{\partial x_1^*} + \mathcal{V}_2^* \frac{\partial T_{12}^*}{\partial x_2^*} + \quad (9,b)$$

$$+ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \mathcal{V}_1^*}{\partial x_2^*} - \frac{\partial \mathcal{V}_2^*}{\partial x_1^*} \right) \left(T_{11}^* - T_{22}^* \right) \right\} = \frac{\partial \mathcal{V}_1^*}{\partial x_2^*} + \frac{\partial \mathcal{V}_2^*}{\partial x_1^*},$$

$$T_{21}^* + We \left\{ \nu_1^* \frac{\partial T_{21}^*}{\partial x_1^*} + \nu_2^* \frac{\partial T_{21}^*}{\partial x_2^*} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \nu_1^*}{\partial x_2^*} - \frac{\partial \nu_2^*}{\partial x_1^*} \right) \left(T_{11}^* - T_{22}^* \right) \right\} = \frac{\partial \nu_1^*}{\partial x_2^*} + \frac{\partial \nu_2^*}{\partial x_1^*}, \quad (9,г)$$

де $Re = \frac{\rho \bar{u} H'}{\eta_c}$ – число Рейнольдса;
 $We = \frac{\theta_c \bar{u}}{H'}$ – число Вейсенберга.

Якщо обмежитися течією, за якої інерційними членами можна нехтувати, то ліва частина рівнянь (8) стане рівною нулю. Застосовуючи рівняння нерозривності (7), введемо функцію течії:

$$\nu_1^* = \frac{\partial \psi}{\partial x_2^*}, \quad \nu_2^* = -\frac{\partial \psi}{\partial x_1^*}. \quad (10)$$

Вважаючи паузейлівським профіль швидкості на вході в тріщину, а швидкість на поверхні твердої стінки (умова прилипання) рівною нулю і вважаючи, що у витеклому потоці швидкість постійна, граничні умови набудуть такого вигляду:

$$x_1^* = -\infty, \quad \nu_1^* = \frac{3}{2}(1-x_2^{*2}), \quad \nu_2^* = 0, \quad (11,а)$$

$$x_1^* = 0, \quad 0 \leq x_2^* \leq h^*, \quad \nu_1^* = \nu_0^*, \quad \nu_2^* = 0, \quad (11,б)$$

$$x_1^* = 0, \quad h^* \leq x_2^* \leq 1, \quad \nu_1^* = \nu_2^* = 0, \quad (11,в)$$

$$x_2^* = 0, \quad \frac{\partial \nu_1^*}{\partial x_2^*} = \nu_2^* = 0, \quad (11,г)$$

$$x_2^* = 1, \quad \nu_1^* = \nu_2^* = 0, \quad (11,д)$$

де $\nu_0^* = const$ визначається витратною швидкістю;

h^* – безрозмірна величина, рівна $\frac{h'}{H'}$;

$2h'$ – ширина тріщини.

Для визначення полів течії і напруження необхідно розв'язати рівняння (7), (8) і (9) відповідно до граничних умов (11). Розв'язати такі загальні рівняння неможливо, тому обмежимося лише повільними течіями. У цьому випадку можна нехтувати не лише інерційними членами, але і вважати число Вейсенберга меншим одиниці.

Слід нагадати, що число Вейсенберга характеризує міру прояву неньютонівського ефекту при зсувній течії. У даному завданні реалізується складна течія, коли наявні і зсувний, і повздовжні градієнти швидкості. Із зростанням швидкості витікання крізь тріщину, як було показано в роботі [12], частка повздовжньої течії зростає, а зсувної – зменшується. Тому доцільно скористатись не числом We , а числом Дебори, яке характеризує прояв неньютонівських властивостей при течії з розтягом [13]. Проте

для стаціонарних течій відношення $\frac{De}{We} = Re^{0,75}$

[13,14], а це означає, що обидва критерії i , We і De взаємозалежні в межах геометрично подібних полів течії.

Тому для тих обмежень, які накладені на дану течію, можна записати швидкості, напруження і функції течії у вигляді розкладання за числом We :

$$\begin{aligned} \nu_i^* &= \nu_i^{(0)} + We \nu_i^{(1)} + We^2 \nu_i^{(2)} + \dots, \\ P^* &= P^{(0)} + We P^{(1)} + We^2 P^{(2)} + \dots, \\ T_{ij}^* &= T_{ij}^{(0)} + We T_{ij}^{(1)} + We^2 T_{ij}^{(2)} + \dots, \\ \psi^* &= \psi^{(0)} + We \psi^{(1)} + We^2 \psi^{(2)} + \dots \end{aligned} \quad (12)$$

Підставивши (12) у рівняння (7), (8), (9) і граничні умови (11), проведемо впорядкування відносно числа Вейсенберга.

Запишемо члени рівнянь, що не містять число Вейсенберга:

$$\frac{\partial \nu_1^{(0)}}{\partial x_1^*} + \frac{\partial \nu_2^{(0)}}{\partial x_2^*} = 0, \quad (13,а)$$

$$\frac{\partial T_{11}^{(0)}}{\partial x_1^*} + \frac{\partial T_{12}^{(0)}}{\partial x_2^*} = \frac{\partial P^{(0)}}{\partial x_1^*}, \quad (13,б)$$

$$\frac{\partial T_{21}^{(0)}}{\partial x_1^*} + \frac{\partial T_{22}^{(0)}}{\partial x_2^*} = \frac{\partial P^{(0)}}{\partial x_2^*}, \quad (13,в)$$

$$T_{11}^{(0)} = 2 \frac{\partial \nu_1^{(0)}}{\partial x_1^*}, \quad T_{22}^{(0)} = 2 \frac{\partial \nu_2^{(0)}}{\partial x_2^*}, \quad (13,г)$$

$$T_{12}^{(0)} = \frac{\partial \nu_1^{(0)}}{\partial x_1^*} + \frac{\partial \nu_2^{(0)}}{\partial x_1^*}, \quad (13,д)$$

$$T_{21}^{(0)} = \frac{\partial \nu_1^{(0)}}{\partial x_1^*} + \frac{\partial \nu_2^{(0)}}{\partial x_1^*}, \quad (13,ж)$$

$$\nu_1^{(0)} = \frac{\partial \psi^{(0)}}{\partial x_2^*}, \quad \nu_2^{(0)} = -\frac{\partial \psi^{(0)}}{\partial x_1^*}. \quad (13,з)$$

Граничні умови:

$$x_1^* = -\infty, \quad \nu_1^{(0)} = \frac{3}{2}(1-x_2^{*2}), \quad \nu_2^{(0)} = 0,$$

$$x_1^* = 0, \quad 0 \leq x_2^* \leq h^*, \quad \nu_1^{(0)} = \nu_0^*, \quad \nu_2^{(0)} = 0,$$

$$x_1^* = 0, \quad h^* \leq x_2^* \leq 1, \quad \nu_1^{(0)} = \nu_2^{(0)} = 0,$$

$$x_2^* = 0, \quad \frac{\partial \nu_1^{(0)}}{\partial x_2^*} = \nu_2^{(0)} = 0, \quad (14)$$

$$x_2^* = 1, \quad \nu_1^{(0)} = \nu_2^{(0)} = 0.$$

Враховуючи рівняння (13), виразивши

$\frac{\partial P^{(0)}}{\partial x_1^*}$, $\frac{\partial P^{(0)}}{\partial x_2^*}$ через $\psi^{(0)}$ і її похідні та виключивши $P^{(0)}$, одержимо:

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x_1^{*2}} + \frac{\partial^2}{\partial x_2^{*2}} \right) \psi^{(0)} = 0. \quad (15)$$

Для граничних умов (14) розв'язок рівняння (15)

$$\psi^{(0)} = \psi^{(0)}(x_1^*, x_2^*)$$

описує течію неньютонівської рідини.

Підставивши рівняння (12) у рівняння (9) та згрупувавши члени, що містять число Вейсенберга, у першій степені, одержимо:

$$T_{11}^{(1)} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_1^{(0)}}{\partial x_2^*} - \frac{\partial v_2^{(0)}}{\partial x_1^*} \right) \left(T_{12}^{(0)} + T_{21}^{(0)} \right) + 2 \frac{\partial v_1^{(1)}}{\partial x_1^*} - v_1^{(0)} \frac{\partial T_{11}^{(0)}}{\partial x_1^*} - v_2^{(0)} \frac{\partial T_{11}^{(0)}}{\partial x_2^*}, \quad (16,а)$$

$$T_{22}^{(1)} = 2 \frac{\partial v_2^{(1)}}{\partial x_2^*} - \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_1^{(0)}}{\partial x_2^*} - \frac{\partial v_2^{(0)}}{\partial x_1^*} \right) \left(T_{12}^{(0)} + T_{21}^{(0)} \right) - v_1^{(0)} \frac{\partial T_{22}^{(0)}}{\partial x_1^*} - v_2^{(0)} \frac{\partial T_{22}^{(0)}}{\partial x_2^*}, \quad (16,б)$$

$$T_{12}^{(1)} = \frac{\partial v_1^{(1)}}{\partial x_2^*} + \frac{\partial v_2^{(1)}}{\partial x_1^*} - \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_1^{(0)}}{\partial x_2^*} - \frac{\partial v_2^{(0)}}{\partial x_1^*} \right) \left(T_{11}^{(0)} - T_{22}^{(0)} \right) - v_1^{(0)} \frac{\partial T_{12}^{(0)}}{\partial x_1^*} - v_2^{(0)} \frac{\partial T_{12}^{(0)}}{\partial x_2^*}, \quad (16,в)$$

$$T_{21}^{(1)} = \frac{\partial v_1^{(1)}}{\partial x_2^*} + \frac{\partial v_2^{(1)}}{\partial x_1^*} - \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_1^{(0)}}{\partial x_2^*} - \frac{\partial v_2^{(0)}}{\partial x_1^*} \right) \left(T_{11}^{(0)} - T_{22}^{(0)} \right) - v_1^{(0)} \frac{\partial T_{21}^{(0)}}{\partial x_1^*} - v_2^{(0)} \frac{\partial T_{21}^{(0)}}{\partial x_2^*}, \quad (16,г)$$

де $v_i^{(0)}, T_{ij}^{(0)}$ – складові швидкості і напружень членів рівняння, які містять число Вейсенберга в нульовій степені та є відомими.

Перетворюючи аналогічним чином рівняння нерозривності, рівняння руху та граничні умови, одержимо:

$$\frac{\partial v_1^{(1)}}{\partial x_1^*} + \frac{\partial v_2^{(1)}}{\partial x_2^*} = 0, \quad (17,а)$$

$$\frac{\partial T_{11}^{(1)}}{\partial x_1^*} + \frac{\partial T_{12}^{(1)}}{\partial x_2^*} = \frac{\partial P^{(1)}}{\partial x_1^*}, \quad (17,б)$$

$$\frac{\partial T_{21}^{(1)}}{\partial x_1^*} + \frac{\partial T_{22}^{(1)}}{\partial x_2^*} = \frac{\partial P^{(1)}}{\partial x_2^*}. \quad (17,в)$$

Граничні умови:

$$\begin{aligned} x_1^* = -\infty, & \quad v_1^{(1)} = v_2^{(1)} = 0, \\ x_1^* = 0, & \quad v_1^{(1)} = v_2^{(1)} = 0, \\ x_2^* = 1, & \quad v_1^{(1)} = v_2^{(1)} = 0, \\ x_2^* = 0, & \quad v_1^{(1)} = v_2^{(1)} = 0. \end{aligned} \quad (18)$$

Функція течії (10) набуває такого вигляду:

$$v_1^{(1)} = \frac{\partial \psi^{(1)}}{\partial x_2^*}, \quad v_2^{(1)} = -\frac{\partial \psi^{(1)}}{\partial x_1^*}. \quad (19)$$

Враховуючи (19) і виключаючи з рівняння (17) $P^{(1)}$, одержимо рівняння:

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x_1^{*2}} + \frac{\partial^2}{\partial x_2^{*2}} \right) \psi^{(1)} = 0. \quad (20)$$

Розв'язок рівняння (20) з граничними умовами (18) має вигляд $\psi^{(1)} = 0$, тобто члени рівняння, що містять число Вейсенберга в першій

степені, не впливають на розподіл швидкості. Проте, як видно з рівняння (16), напруження $T_{11}^{(1)}, T_{22}^{(1)}, T_{12}^{(1)}, T_{21}^{(1)}$ відображають вплив пружності членів рівняння, що містять число Вейсенберга в першій степені.

Підставляючи рівняння (12) у рівняння (19), враховуючи, що $v_1^{(1)} = v_2^{(1)} = 0$, та згрупувавши члени, які містять число Вейсенберга у другій степені, одержимо:

$$T_{11}^{(2)} = 2 \frac{\partial v_1^{(2)}}{\partial x_1^*} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_1^{(0)}}{\partial x_2^*} - \frac{\partial v_2^{(0)}}{\partial x_1^*} \right) \left(T_{12}^{(1)} + T_{21}^{(1)} \right) - v_1^{(0)} \frac{\partial T_{11}^{(1)}}{\partial x_1^*} - v_2^{(0)} \frac{\partial T_{11}^{(1)}}{\partial x_2^*}, \quad (21,а)$$

$$T_{22}^{(2)} = 2 \frac{\partial v_2^{(2)}}{\partial x_2^*} - \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_1^{(0)}}{\partial x_2^*} - \frac{\partial v_2^{(0)}}{\partial x_1^*} \right) \left(T_{12}^{(1)} + T_{21}^{(1)} \right) - v_1^{(0)} \frac{\partial T_{22}^{(1)}}{\partial x_1^*} - v_2^{(0)} \frac{\partial T_{22}^{(1)}}{\partial x_2^*}, \quad (21,б)$$

$$T_{12}^{(2)} = \frac{\partial v_1^{(2)}}{\partial x_2^*} + \frac{\partial v_2^{(2)}}{\partial x_1^*} - \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_1^{(0)}}{\partial x_2^*} - \frac{\partial v_2^{(0)}}{\partial x_1^*} \right) \left(T_{11}^{(1)} - T_{22}^{(1)} \right) - v_1^{(0)} \frac{\partial T_{12}^{(1)}}{\partial x_1^*} - v_2^{(0)} \frac{\partial T_{12}^{(1)}}{\partial x_2^*}, \quad (21,в)$$

$$T_{21}^{(2)} = \frac{\partial v_1^{(2)}}{\partial x_2^*} + \frac{\partial v_2^{(2)}}{\partial x_1^*} - \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_1^{(0)}}{\partial x_2^*} - \frac{\partial v_2^{(0)}}{\partial x_1^*} \right) \left(T_{11}^{(1)} - T_{22}^{(1)} \right) - v_1^{(0)} \frac{\partial T_{21}^{(1)}}{\partial x_1^*} - v_2^{(0)} \frac{\partial T_{21}^{(1)}}{\partial x_2^*}. \quad (21,г)$$

Рівняння нерозривності, рівняння руху, граничні умови і функція течії мають такий самий вигляд, як і рівняння (17), (18) і (19) після заміни в останніх індексу (1) на (2).

Відтак, виключаючи $P^{(2)}$, одержимо:

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial^2}{\partial x_1^{*2}} + \frac{\partial^2}{\partial x_2^{*2}} \right) \psi^{(2)} &= \frac{\partial^2 v_1^{(0)}}{\partial x_2^* \partial x_1^*} \left(\frac{\partial A}{\partial x_1^*} + \frac{\partial A}{\partial x_2^*} \right) + \\ &+ \frac{\partial v_1^{(0)}}{\partial x_2^*} \left(\frac{\partial^2 A}{\partial x_1^{*2}} + 2 \frac{\partial^2 T_{12}^{(1)}}{\partial x_2^* \partial x_1^*} \right) + \frac{\partial v_2^{(0)}}{\partial x_1^*} \left(\frac{\partial^2 A}{\partial x_2^{*2}} - 2 \frac{\partial^2 T_{12}^{(1)}}{\partial x_1^* \partial x_2^*} \right) - \\ &- C \frac{\partial^2 B}{\partial x_1^* \partial x_2^*} - \frac{B}{2} \left(2 \frac{\partial^2 C}{\partial x_1^* \partial x_2^*} - \frac{\partial^2 A}{\partial x_2^{*2}} + \frac{\partial^2 A}{\partial x_1^{*2}} \right) - \\ &- \frac{\partial B}{\partial x_1^*} \left(\frac{\partial C}{\partial x_2^*} + \frac{\partial A}{\partial x_1^*} \right) + \frac{\partial B}{\partial x_2^*} \left(\frac{\partial A}{\partial x_2^*} - \frac{\partial C}{\partial x_1^*} \right) + \frac{\partial^2 v_1^{(0)}}{\partial x_2^{*2}} \cdot \frac{\partial T_{12}^{(1)}}{\partial x_1^*} + \\ &+ \frac{\partial^2 v_2^{(0)}}{\partial x_2^{*2}} \cdot \frac{\partial T_{12}^{(1)}}{\partial x_2^*} - \frac{\partial^2 v_1^{(0)}}{\partial x_1^{*2}} \cdot \frac{\partial T_{12}^{(1)}}{\partial x_1^*} - \frac{\partial^2 v_2^{(0)}}{\partial x_1^{*2}} \cdot \frac{\partial T_{21}^{(1)}}{\partial x_2^*} + \\ &+ 2 \frac{\partial v_2^{(0)}}{\partial x_2^{*2}} \left(\frac{\partial^2 T_{12}^{(1)}}{\partial x_2^{*2}} + \frac{\partial^2 T_{12}^{(1)}}{\partial x_1^{*2}} \right) + \frac{A}{2} \left(\frac{\partial^2 B}{\partial x_2^{*2}} - \frac{\partial^2 B}{\partial x_1^{*2}} \right) + \\ &+ v_1^{(0)} \left(\frac{\partial^3 T_{12}^{(1)}}{\partial x_2^{*2} \partial x_1^*} - \frac{\partial^3 T_{12}^{(1)}}{\partial x_1^{*3}} + \frac{\partial^3 A}{\partial x_1^{*2} \partial x_2^*} \right) + \\ &+ v_2^{(0)} \left(\frac{\partial^3 T_{12}^{(1)}}{\partial x_2^{*3}} - \frac{\partial^3 T_{12}^{(1)}}{\partial x_2^{*2} \partial x_2^*} + \frac{\partial^3 A}{\partial x_2^{*2} \partial x_1^*} \right). \end{aligned} \quad (22)$$

Тут

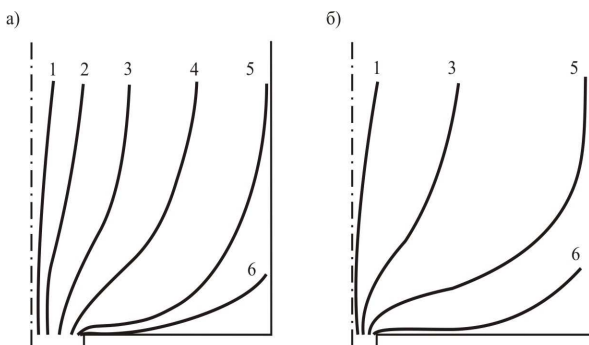
$$A = T_{11}^{(1)} - T_{22}^{(1)}; \quad B = \frac{\partial v_1^{(0)}}{\partial x_2^*} - \frac{\partial v_2^{(0)}}{\partial x_1^*}; \quad C = T_{12}^{(1)} + T_{21}^{(1)}.$$

Оскільки права частина рівняння (22) відома, то, розв'язавши рівняння (22), що включає граничні умови, визначимо члени, що містять число Вейсенберга в другій степені, які характеризують розподіл швидкостей і напружень.

Результати та їх аналіз

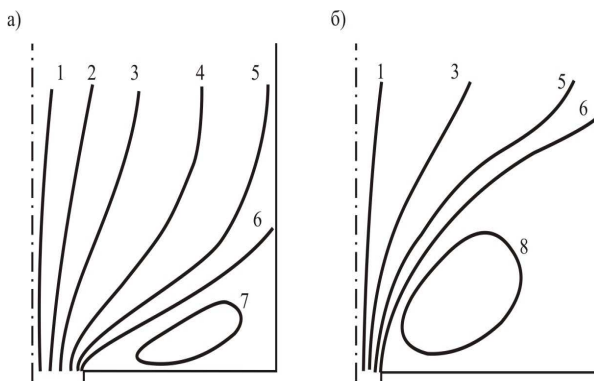
Реалізація задачі була здійснена числовим методом [15, 16]. Слід зазначити, що права частина рівняння (22) (на відміну від роботи [11]) містить похідні більш високого порядку.

На рис. 3 і 4 показана функція течії при витіканні крізь тріщину ньютонівської ($We=0$) і в'язкопружної ($We=0,1$) рідин. Видно, що зі зменшенням коефіцієнта стискування каналу вплив входу в тріщину на функцію течії зростає. Циркуляційна зона (рис. 3,б), що виникає при течії в тріщину в'язкопружної рідини, від правого кута каналу доходить до тріщини і займає область трикутної форми, а лінії течії утворюють вхідний струмінь. Отже, зменшення коефіцієнта стискування каналу (і збільшення We) призводить до виникнення вхідного затопленого струменя.



$We = 0$, Ψ : 1 – 0,125, 2 – 0,375, 3 – 0,625, 4 – 0,875, 5 – 0,9715, 6 – 1,0;
а) $h'/H' = 0,2$; б) $h'/H' = 0,07$

Рисунок 3 – Функція течії при протіканні крізь тріщину ньютонівської рідини

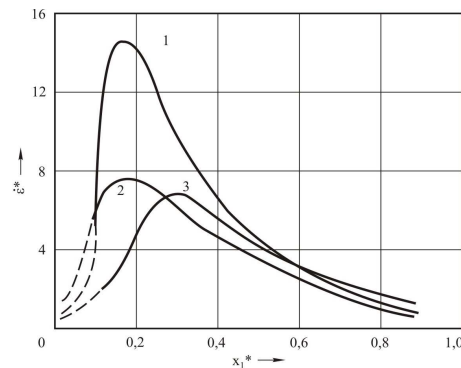


$We = 0,1$, Ψ : 1 – 0,125, 2 – 0,375, 3 – 0,625, 4 – 0,875, 5 – 0,9715, 6 – 1,0, 7 – 1,01, 8 – 1,1;
а) $h'/H' = 0,2$; б) $h'/H' = 0,07$

Рисунок 4 – Функція течії при протіканні крізь тріщину в'язкопружної рідини

На рис. 5 показаний розподіл безрозмірного повздовжнього градієнта швидкості на осі потоку при впадінні в тріщину ньютонівської (криві 1 і 2) і в'язкопружної (крива 3) рідин. Видно, що максимального значення градієнт швидкості при течії ньютонівської рідини досягає на відстані $3h'$ і ($x_1^*=1,5$) від тріщини для коефіцієнтів стискування 0,2 і 0,07 відповідно. Поява у рідини, що тече, в'язкопружних властивостей зміщує максимум на кривій $\dot{\epsilon}^* = f(x_1^*)$

в область великих X^1 і знижує величину $\dot{\epsilon}_{max}^*$. Зіставляючи експериментальні дані з результатами розрахунку, бачимо, що розраховані лінії течії і розподіл градієнта швидкості відповідають експериментально отриманим в області відносно малих швидкостей.



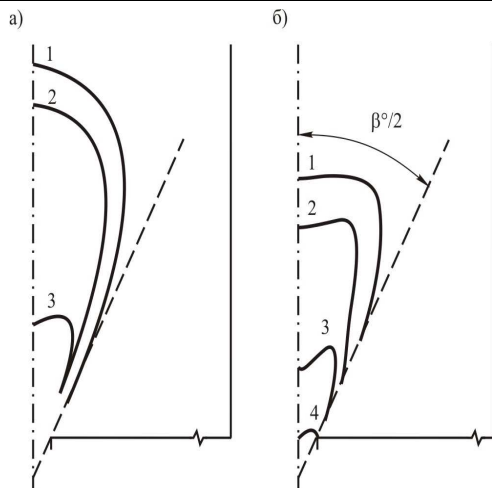
1: $h'/H' = 0,07$, $We = 0$; 2: $h'/H' = 0,2$, $We = 0$;
3: $h'/H' = 0,2$, $We = 0,1$

Рисунок 5 – Розподіл безрозмірного повздовжнього градієнта швидкості на осі потоку рідини, що втікає у тріщину

Розподіл безрозмірного нормального напруження для коефіцієнта стискування каналу 0,07 і числа Вейсенберга 0,1 наведено на рис. 6,а. Ці результати досить добре відображають експериментальні дані з розподілу ізохром у вхідній області щілини (рис. 5,б і [17]). Оскільки в досліджуваній системі (полістирол-бромформ) полімер і розчинник мали рівні показники заломлення, то отримані лінії рівних значень двопронезаломлення (ізохром) усередині затопленого вхідного струменя пропорційні першій різниці нормальних напружень.

Таким чином, розраховані лінії течії, поля швидкостей і їх градієнтів, а також розподіл напружень при витіканні крізь тріщину в тріщинувато-пористому колекторі ньютонівської і в'язкопружної рідин, принаймні, якісно узгоджуються з наявними експериментальними даними, якщо обмежитися відносно малими швидкостями, тобто тими режимами течії, коли в'язкопружні властивості тільки починають проявлятися.

Література



Кутова напівширина потоку ($\beta^\circ/2$) – 30° ;
 а) $We = 0,1$, $h'/H' = 0,07$;
 T^* : 1 – 5, 2 – 7, 3 – 45;
 б) Δn : 1 – 10^{-4} , 2 – $7 \cdot 10^{-4}$, 3 – $15 \cdot 10^{-4}$,
 4 – $62 \cdot 10^{-4}$

Рисунок 6 – Розподіл безрозмірних нормальних напруг (а) і ізохром (б) у вхідній області тріщини

Отримані результати вказують на те, що чисельний метод аналізу збіжної течії в'язкопружної рідини Максвелла, можна використати для розрахунку повздовжніх градієнтів швидкості, що реалізуються у вхідній області тріщин під час течії розчинів полімерів у тріщинувато-пористих колекторах. Слід, проте, відмітити, що в загальному випадку необхідно враховувати вплив кута входу в тріщину, що можна зробити, розглянувши завдання в прямонахилених або криволінійних координатах. При цьому аналіз течії в'язкопружної рідини в тріщенувато-пористому колекторі різко ускладнюється.

ВИСНОВКИ

1. Проведений чисельний аналіз витікання крізь щілину в'язкопружної рідини має визначальне значення, насамперед, стосовно підтвердження запропонованої в роботах [18] інтерпретації експериментальних даних, що характеризують особливості збіжної течії водних розчинів ПЕО у вхідній області отвору чи тріщини.

2. Результати розрахунку підтверджують отримані з експериментального вирішення цього питання уявлення про деформаційно-напружений стан макромолекул ПЕО (елементів рідини) при течії розчину ПЕО у вхідній області щілини в нафтовому колекторі і підтверджують можливість використання чисельного методу аналізу збіжної течії розчину полімеру для розрахунку повздовжніх градієнтів швидкості, що реалізуються у вхідній області щілини, а також можуть служити додатковим підтвердженням запропонованого в роботі [19] механізму підвищення нафтовилучення з пластів шляхом використанням розчинів полімерів.

1 Pogrebnyak V. G. Dynamic structurization in solutions of Hydrodynamically active polymers // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 1992. – Vol. 63. – No 2. – Pp. 763–765.

2 Pogrebnyak V. G. Polymer Macromolecules as a Tool for Studying Wall-Adjacent Turbulence Flow / V. G. Pogrebnyak // Proceedings of the 2nd International Symposium on Seawater Drag Reduction / ASERC, Korea – Busan, 2005. – Pp. 79–90.

3 De Gennes P. G. Coil-stretch transition of dilute flexible polymers under ultrahigh velocity gradients / de P. G. Gennes // J. Chem. Phys. – 1974. – Vol. 60, No 12. – Pp. 5030–5042.

4 Астарита Дж. Основы гидромеханики неньютоновских жидкостей / Дж. Астарита, Дж. Маруччи. – М.: Мир, 1978. – 309 с.

5 Войткунский Я. И. Уравнения движения жидкости с учетом ее релаксационных свойств / Войткунский Я. И., Амфилохий В. В., Павловский В. А. // Сб. науч. тр. / Ленингр. кораблестр. ин-т. – Л., 1970. – № 69. – С. 19–25.

6 Виноградов Г. В. Реология полимеров / Виноградов Г. В., Малкин А. Я. – М.: Химия, 1977. – 438 с.

7 Ферри, Дж. Д. Вязкоупругие свойства полимеров / Ферри Джон Д.; пер. с англ. под ред. [и с предисл.] Гуля В. Е. – М.: Иностран. лит., 1963. – 535 с.

8 Мидлман, С. Течение полимеров / Мидлман С.; пер. с англ. Панова Ю. Н.; под ред. Малкина А. Я. – М.: Мир, 1971. – 259 с.

9 Кристенсен, Р. Введение в теорию вязкоупругости / Кристенсен Р.; пер. с англ. Рейтмана М. И.; под ред. Г. С. Шапиро. – М.: Мир, 1974. – 338 с.

10 Лодж, А. С. Эластичные жидкости. Введение в реологию конечнодеформируемых полимеров / Лодж А. С.; пер. с англ. Б. М. Берковского и З. П. Шульмана. – М.: Наука, 1969. – 463 с.

11 Накамура К. Медленное истечение вязкоупругой жидкости по коническому каналу через щель / Накамура К. и [и др.] // Сэнкэй кикай гаккай си. – 1978. – Т. 31, № 8. – С. 49–55; переклад № Б-31876 / С. К. Завьялов. – М.: Всесоюз. центр перекладу. науково-техн. літер. і докумен., 1979 – 18 с.

12 Pogrebnyak A.V. Degradation of Polymer Solutions in a Hydrodynamic Field with a Longitudinal Velocity Gradient / A.V. Pogrebnyak, I.V. Perkun, V.G. Pogrebnyak // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2017. – Vol. 90. – No 5. – Pp. 1219–1224

13 Астарита, Дж. Основы гидромеханики неньютоновских жидкостей / Дж. Астарита, Дж. Маруччи. – М.: Мир, 1978. – 309 с.

14 Хинце И. О. Турбулентность. Ее механизм и теория / Хинце И. О.; пер. с англ. Яковлевского О. В.; под ред. Г. Н. Абрамовича. – М.: Физ.-мат. гос. изд-во, 1963. – 680 с.

15 Коллатц Л. Задачи на собственные значения с техническими приложениями: пер. со 2-го нем. изд. / Лотар Коллатц ; под общ. ред. В. В. Никольского. – М.: Наука, 1968. – 503 с. – (Физико-математическая школа инженера).

16 Шуп Т. Решение инженерных задач на ЭВМ: практ. рук. / Шуп Т.; пер. с англ. Хохрякова В. А.; под ред. Миносцева В. Б.. – М.: Мир, 1981. – 235 с.

17 Бресткин, Ю. В. Разворачивание макромолекул при сходящемся течении / Ю. В. Бресткин, Д. Х. Амрибахшов, А. А. Холмунинов, С. Я. Френкель // Изв. АН УзССР. Сер. физ.-мат. навк. – 1988. – № 6. – С. 80–84.

18 Pogrebnyak A. The Elastic Deformations and Anomalously High Cutting Ability of a Polymer Solution Jet / A. Pogrebnyak, V. Pogrebnyak // Вісник ТНТУ. – Тернопіль: ТНТУ ім. Івана Пулюя, 2017. – № 1(85).– P. 89–94.

19 Pogrebnyak V.G. Displacement of Oil from Porous Bed by the Oscillating Flow of Polymer Solution / I. V. Perkun, A. V. Pogrebnyak // American Journal of Science, Engineering and Technology. –2016. – Vol. 1 – No 2. – P. 53–57.

*Стаття надійшла до редакційної колегії
01.11.18*

*Рекомендована до друку
професором **Кондратом О.Р.**
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)
д-р фіз.-мат. наук **Холмуміновим А.А.**
(Інститут Хімії та фізики полімерів АН РУз,
м. Ташкент)*

РОЗВИТОК АКУСТИЧНОГО ВИДУ КОНТРОЛЮ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ТА ОЦІНЮВАННЯ СТРУКТУРНИХ ЗМІН СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ

Н.І. Чабан, І.В. Рибіцький, В.Д. Миндюк

*ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 506611,
e-mail: chaban.n11@gmail.com*

Виявлення дефектів на стадії їх зародження, тобто на стадії структурних змін матеріалу металоконструкцій, є актуальною проблемою. Розглянуто основні методи визначення структурних змін матеріалу металоконструкцій, проаналізовано їх переваги і недоліки, запропоновано новий метод визначення структурних змін за допомогою сучасних методів неруйнівного контролю, а саме ультразвукових фазованих ґраток.

Ключові слова: акустичні структурні шуми, структуроскопія, залишковий ресурс.

Выявление дефектов на стадии их зарождения, то есть на стадии структурных изменений материала металлоконструкций является актуальной проблемой. Рассмотрены основные методы определения структурных изменений материала металлоконструкций, проанализированы их преимущества и недостатки, предложен новый метод определения структурных изменений с помощью современных методов неразрушающего контроля, а именно ультразвуковых фазированных решеток.

Ключевые слова: акустические структурные шуми, структуроскопии, остаточный ресурс.

Detection of defects at the stage of their origination, specifically at the stage of structural changes in the metal structures material, is the current issue. The main methods for determining the structural changes in the material of metal structures are considered, their advantages and disadvantages are analyzed, a new method for determining the structural changes using modern methods of non-destructive testing, namely ultrasonic phased arrays is proposed.

Key words: acoustic structural noise, structuroscopy, residual resource.

Вступ

Більшість обладнання нафтогазового комплексу під час експлуатації зазнає впливу циклічно-змінних, механічних, теплових навантажень та дії корозійно-активних середовищ. Ці впливи призводять до зміни напружено-деформованого стану металу, які у поєднанні з надлишковим внутрішнім тиском середовища можуть сприяти прискореному розвитку дефектів, особливо в місцях з концентраторами напружень, та призводити до руйнування конструкції.

Існуючі на даний час ультразвукові, електромагнітні та вихрострумові методи неруйнівного контролю спрямовані здебільшого на виявлення дефектів, що вже утворилися. Однак важливіше вчасно виявити початковий етап процесу накопичення пошкодженості в металі шляхом визначення змін структурного стану металу щоб уникнути небажаних наслідків [1-5].

В даній статті проаналізовано особливості застосування ультразвукового методу з використанням фазованих ґраток для оцінювання змін мікроструктури сталевих сплавів.

Висвітлення невіршених раніше частин загальної проблеми, якій присвячується стаття

На даному етапі розвитку неруйнівних методів оцінювання стану мікроструктури матеріалів існує ряд обмежень щодо їх застосування, які обумовлені недостатньою чутливістю та впливом інших чинників на результати контро-

лю. Авторами представлено результати застосування методу ультразвукових фазованих ґраток (УЗФГ) для виявлення структурних змін матеріалу металоконструкцій.

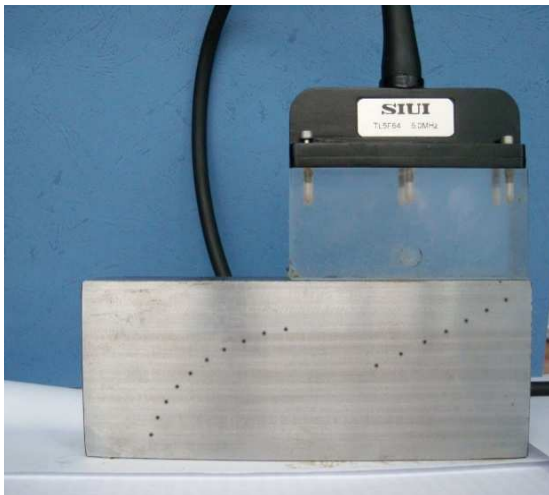
Формулювання цілей статті

Метою даної статті є висвітлення особливостей застосування сучасних ультразвукових неруйнівних методів виявлення структурних змін матеріалу металоконструкцій довготривалої експлуатації.

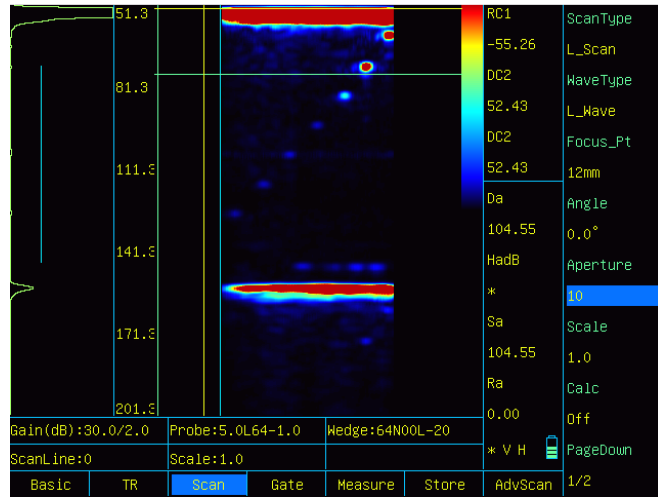
Висвітлення основного матеріалу

Більшість об'єктів неруйнівного контролю в нафтогазовій галузі – полікристалічні тверді тіла, кожне зерно яких є монокристалом (кристаліт) з пружною анізотропією, яка викликає розсіювання акустичних хвиль в полікристалічному твердому тілі внаслідок відбиття, заломлення і трансформації акустичних хвиль на межах зерен. Під час виготовлення цих об'єктів (лиття, обробка тиском, термічна обробка та ін.) і в процесі життєвого циклу структура металу може істотно змінюватися через появу неоднорідностей, анізотропії, пошкодження структури [6-8]. Останні можуть слугувати індикатором незворотних змін, накопичених в матеріалі. Тому визначення фактичного структурного стану матеріалу виробів є одним з актуальних напрямків структуроскопії в неруйнівному контролі.

Більшість акустичних методів оцінки структурного стану металу засновані на вимірю-



а)



б)

Рисунок 1 – Зразок для налаштування ультразвукового дефектоскопа (а) і відображення структурних шумів та імітаторів дефектів типу тріщини на екрані дефектоскопа з УЗФГ (б)

ванні швидкості поширення ультразвукових (УЗ) коливань.

Швидкість поширення ультразвукових хвиль у металах функціонально пов'язана з їх модулями пружності, які, в свою чергу, визначаються силою взаємодії між сусідніми атомами в кристалічній ґратки. При зміні будови кристалічної ґратки, наприклад внаслідок пластичної деформації, змінюються сили взаємодії між атомами, відповідно змінюються і модулі пружності, що призводить до зміни швидкості поширення ультразвуку у металах.

Однак УЗ методи потребують високочутливих приладів фіксування сигналів (з точністю 0,05%), оскільки зміна швидкості поширення ультразвуку в металах через зміну структури чи режимів термічної обробки не перевищує 3%. [9].

Акустичні методи, які базуються на явищах затухання ультразвукових (УЗ) хвиль [10-11], характеризуються великою похибкою вимірювань (до 10%) та високою трудоемкістю процесу вимірювання.

Останнім часом для вирішення задач структуроскопії застосовують електромагнітний метод збудження і реєстрації ультразвукових хвиль [12-13], перевагою якого є безконтактність [14]. До недоліків даного методу можна віднести великі габаритні розміри електромагнітних-акустичних перетворювачів (ЕМА), які забезпечують сильне підмагнічування зразків та малу чутливість контролю (в порівнянні з п'єзоелектричними перетворювачами).

Саме низька чутливість обмежує застосування всіх згаданих методів, тому актуальною проблемою залишається пошук нових і модернізація існуючих методів структуроскопії матеріалів.

Авторам статті запропоновано використання сучасних неруйнівних методів для виявлення структурних змін матеріалу, зокрема ультразвукових дефектоскопів, у комплектованих з п'єзоелектричними перетворювачами з ультразвуковими фазованими ґратками (УЗФГ).

Процес формування акустичного зображення внутрішньої структури металу та можливих дефектів розглянемо на прикладі зразка для налаштування дефектоскопа (рис.1) [15-17].

Для отримання зображення перерізу візуалізованої області об'єкта весь набір прийнятих УЗ сигналів, відбитих від кожної точки дефекту, піддають когерентній просторово-часовій обробці, що є результатом сумування відгуків (луно-сигналів, отриманих при різних ракурсах) від деякої точки простору всередині візуалізованої області і присвоєння результату сумування певного градієнта певному кольору. Цю операцію виконують для всіх точок простору, що знаходяться в площині візуалізованого перерізу.

У результаті контролю з використанням п'єзоелектричних перетворювачів з УЗФГ з електронним скануванням формується секторна розгортка області сканування, на якій амплітуда луно-сигналу від відбивача кодується кольором. Перехід кольору від темно-синього до червоного відповідає збільшенню амплітуди луно-імпульсу відбитого сигналу. Так, в результаті заломлення та трансформації ультразвукових сигналів від груп зерен амплітуда луно-імпульсу відбитого сигналу збільшується, внаслідок чого структурні неоднорідності на екрані дефектоскопа відобразатимуться вигляді світло-синіх плям. У місцях, де значення луно-імпульсів є максимальним, утворюються плями червоного кольору, які відображають наявність дефекту.

Відображення результатів прозвучування у вигляді двовимірного кольорового зображення внутрішньої структури об'єкта значно полегшує їх опрацювання, оскільки фахівець з неруйнівного контролю може оперативно локалізувати ділянку об'єкта дослідження з найбільшою кількістю структурних неоднорідностей.

Зразок з сталі марки 40Г розміром 400x300x18,7 мм. було розділено на 200 зон, щоб спростити пошук ідентифікації місця отриманих зображень. (рис. 2) Ультразвукові

дослідження проводили дефектоскопом SIUI CTS-602 з перетворювачем 5.0L-64-1.0-10 та перехідною призмою 64N00L-40. Сканування проводили імпульсами, частотою 5МГц, кут сканування становив 0°, активна апертура – 14, підсилення – 30 дБ.



Рисунок 2 – Зображення досліджуваного зразка сталі 40 Г

В результаті відображення, заломлення і трансформації пройдених акустичних хвиль на межах зерен структурні неоднорідності на екрані відобразились у вигляді світліших і темніших зон. На рисунку 3 структурні неоднорідності виділені кривою білого кольору.

Апаратні можливості дефектоскопа дають можливість зберегти акустичне зображення для подальшого опрацювання. За допомогою програми-аналізатора зображені отримані зображення переводяться в монохромний режим, складаються в логічний ряд, відфільтровуються зображення шумів, утворені призмою (рис. 4).

Метою подальших досліджень є встановлення інформативних параметрів, які якісно і кількісно описують зони неоднорідностей отриманих акустичних шумових зображень та визначення кореляційних зв'язків між цими інформативними параметрами та механічними характеристиками досліджуваних матеріалів, зокрема границі міцності матеріалу.

Результати досліджень в подальшому будуть спрямовані на розроблення методики визначення залишкового ресурсу обладнання за дійсними значеннями границі міцності матеріалу, що визначатимуться комплексом методів неруйнівного контролю.

Висновки

Представлений новий метод оцінки структурних змін металу, заснований на використанні дефектоскопу з УЗФР. Актуальним залишається розроблення технології оброблення отриманих зображень з метою отримання інформативних параметрів акустичного контролю та їх застосування для оцінювання параметрів струк-

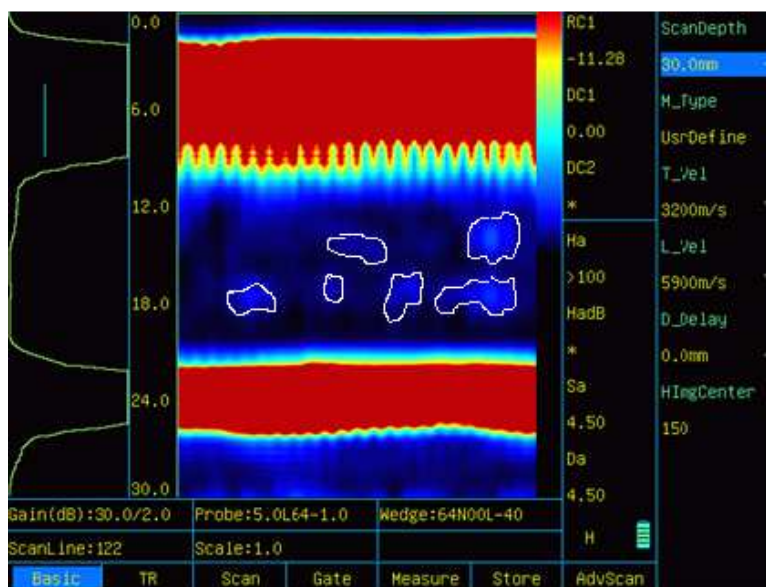


Рисунок 3 – Акустичне зображення ділянки досліджуваного зразка з структурними неоднорідностями, отримане на екрані дефектоскопа за допомогою УЗФР

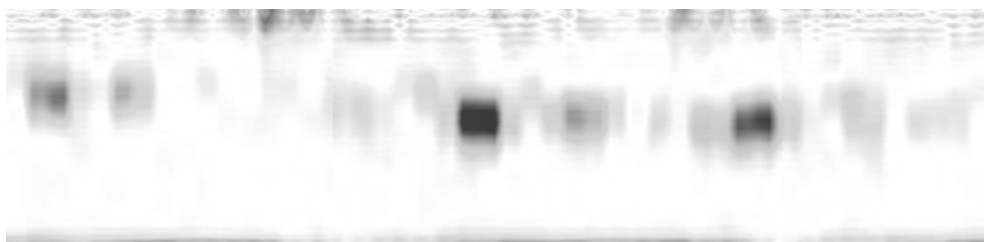


Рисунок 4 – Акустичне зображення структурних неоднорідностей фрагмента досліджуваного зразка після опрацювання програмою-аналізатором

турних неоднорідностей та їх зв'язку з механічними характеристиками досліджуваного матеріалу. За відомих значень дійсних механічних характеристик набуває розвитку метод розрахунку залишкового ресурсу обладнання довготривалої експлуатації за існуючими методиками.

Література

1 Смирнов А.Н. Структурно-фазовое состояние и ресурс длительно работающего металла технических устройств опасных производственных объектов, перспективы дальнейшего развития методов оценки работоспособности / Смирнов А.Н. // Контроль. Диагностика. – 2009. – № 1. – С. 22-32.

2 Буденков Г.А. Исследование напряженно-деформированного состояния ободьев цельно-катаных вагонных колес методом акустической тензометрии / Буденков Г.А. // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – Том 6. – № 3. – С. 111-117.

3 Муравьев В.В. К расчету параметров системы намагничивания электромагнитно-акустического преобразователя / Муравьев В.В. // Интеллектуальные системы в производстве. – 2011. – № 1. – С. 197-205.

4 Муравьев В.В. Оценка остаточных напряжений в ободьях вагонных колес электромагнитно-акустическим методом / Муравьев В.В. // Дефектоскопия. – 2011. – № 8. – С.16-28.

5 Муравьев В.В. Распределение остаточных напряжений при электроконтактном упрочнении бандажей локомотивных колес / Муравьев В.В. // Технология машиностроения. – 2011. – № 9. – С. 42-45.

6 Муравьев В. В. Связь скорости ультразвука с ударной вязкостью и технология контроля качества конструкционных сталей / Муравьев В. В., Сухарев Е. М., Ермолаева З. И. // Контроль. Диагностика. – 2002. – № 7. – С. 49-55.

7 Муравьев В. В. Взаимосвязь структуры и твердости сталей со скоростью объемных и поверхностных акустических волн / Муравьев В. В. // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1991. – № 10. – С. 100-102.

8 Муравьев В. В. Взаимосвязь структуры и механических свойств инструментальной углеродистой стали со скоростью распространения ультразвуковых колебаний / Муравьев В. В., Зев Л. Б., Билута А. П. // Техн. диагностика и неразрушающий контроль. – 1992. – № 2. – С. 69-71.

9 Муравьев В.В. Скорость звука и структура сталей и сплавов / Муравьев В.В., Зев Л. Б., Комаров К.Л. – Новосибирск: Наука, 1996. – 181 с.

10 Буденков Г. А. Оценка напряженного состояния изделий из серого чугуна акустическим методом / Буденков Г. А. // Дефектоскопия. – 1998. – № 7. – С. 3-7.

11 Буденков Г. А. Исследование напряженно-деформированного состояния ободьев цельнокатаных вагонных колес методом акустической тензометрии / Буденков Г. А., Муравьев В. В.,

Коробейникова О. В. // Фундамент. проблемы современного материаловедения. – 2009. – Т. 6. – № 3. – С. 111-117.

12 Муравьев В. В. К расчету параметров системы намагничивания электромагнитно-акустического преобразователя / Муравьев В. В., Стрижак В. А., Балобанов Е. Н. // Интеллектуал. системы в пр-ве. – 2011. – № 1. – С. 197-205.

13 Патент РФ РЕ № 2217741 С2 Многоканальная акустико-эмиссионная система диагностики конструкций / Л. Н. Степанова, А. Н. Серьезнов, М. Круглов, В. В. Муравьев: Бюл. № 33. 27.11.2003. – Москва, ФИПС. – 18 с.

14 Ермолаева З. И. Влияние некоторых структурных параметров на скорость ультразвука в сталях / Ермолаева З. И. // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1999. – № 8. – С. 29-31.

15 Попович О.В. Удосконалення акустичних методів визначення типів та розмірів дефектів металоконструкцій: дисертація кандидата технічних наук: 03.11.16 / Попович Ольга Василівна. – Івано-Франківськ, 2008. – 128 с.

16 Junshan Gao, Ke Wang. Study on the technology of ultrasonic imaging detection based on phased array / International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition. 2013. Vol. 8, No.5. P.71-78

17 Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications: R/D Tech Guideline. – Quebec: R/D Tech inc., 2004. – 368 p.

*Стаття надійшла до редакційної колегії
20.09.18*

*Рекомендована до друку
професором Райтером П.М.
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)
д-ром техн. наук Баняхевичем Ю.В.
(ЛЧМГ ПАТ «Укртрансгаз», м. Львів)*

Наука — виробництву

УДК 621.438:622

DOI: 10.31471/1993-9973-2018-3(68)-31-37

ПРОГНОЗУВАННЯ РЕМОНТНИХ РОБІТ МАГІСТРАЛЬНИХ ГАЗОПРОВІДІВ В УМОВАХ ЦЕНТРАЛІЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ОБСЛУГОВУВАННЯ

¹ В.Я. Грудз, ¹ Я.В. Грудз, ² В.М. Боднар, ³ В.В. Самсоненко

¹ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 727138,
e-mail: public@nimg.edu.ua

²БМФ Укргазпромбуд; 076001, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 775931,
e-mail: bodnar-vm@utg.ua

³УМГ Харківтрансгаз; 61001, м. Харків, вул. Культури, 20А, тел. (057) 7019303,
e-mail: samsonenko-vv@utg.ua

Розглядається процес керування технічним станом магістральних газопроводів, які включають різноманітні елементи і мають складну розгалужену і за кільцювану структуру. Задача відноситься до категорії оптимізації процесу обслуговування. Метою дослідження є оптимізація графіка профілактичних ремонтів системи газопостачання, яка включає незалежні підсистеми. Оптиміальний графік технічного обслуговування визначиться з умови вибору значень моментів часу, що забезпечують екстремум показників якості функціонування комплексу технологічних об'єктів у зоні централізованого обслуговування системи газопостачання. Як критерій оптимальності процесу обслуговування запропоновано використати техніко-економічний показник, зокрема середні сумарні питомі витрати на експлуатацію системи. Отримані в результаті проведених досліджень залежності дають змогу оцінювати режими обслуговування складної системи газопостачання, що включає різноманітні, територіально розосереджені, але функціонально взаємозалежні технологічні об'єкти системи газопостачання в регіоні центральної бази технічного обслуговування і ремонту, вони дають можливість розраховувати оптимальний графік планових ремонтів системи газопостачання.

Ключові слова: система газопостачання, обслуговування, оптимізація, графік профілактичних ремонтів, сумарні питомі витрати.

Рассматривается процесс управления техническим состоянием магистральных газопроводов, которые включают разнотипные элементы и имеют сложную разветвленную и закольцованную структуру. Задача относится к категории оптимизации процесса обслуживания. Целью исследования является оптимизация графика профилактических ремонтов системы газоснабжения, которая включает независимые подсистемы. Оптимальный график технического обслуживания определится из условия выбора значений моментов времени, обеспечивающих экстремум показателей качества функционирования комплекса технологических объектов в зоне централизованного обслуживания системы газоснабжения. Как критерий оптимума процесса обслуживания предложено использовать технико-экономический показатель, в частности средние суммарные удельные расходы на эксплуатацию системы. Полученные в результате проведенных исследований зависимости позволяют оценивать режимы обслуживания сложной системы газоснабжения, включающие разнотипные, территориально рассредоточенные, но функционально взаимозависимые технологические объекты системы газоснабжения в регионе центральной базы технического обслуживания и ремонта, они позволяют рассчитывать оптимальный график плановых ремонтов системы газоснабжения.

Ключевые слова: система газоснабжения, обслуживания, оптимизация, график профилактических ремонтов, суммарные удельные расходы.

The management process of the gas-main pipelines' technical state that includes different-type constituent elements and has a complex multihole and looped structure is considered. The task falls under the optimization category of the maintenance process. The study aims to optimize the preventive overhaul graph of the gas supply system that includes independent subsystems. An optimum schedule of maintenance service will be determined by selection condition of the timepoint values that provide with the quality indicators' extremum of the functioning of the process facility complex within a centralized service of gas supply system. It was suggested the technical-and-economic index, in particular the average summarized unit costs to system operation, be used as a criterion for the optimality of maintenance process. The characteristic curve obtained from conducted studies provides a way to estimate the maintenance states of the complicated gas supply system that includes different-type, geographically distributed but functionally interlinked process facilities of the gas supply system in the region of the central maintenance and repair base, they give an opportunity to plan an optimum schedule of the preventive overhaul of the gas supply system.

Keywords: gas supply system, maintenance, optimization, preventive overhaul graph, summarized unit costs.

Система магістральних газопроводів, з точки зору процесу обслуговування, є надзвичайно складною технічною мережею з розгалуженою і закільцьованою газотранспортною мережею, спорудженою з різнотипових газопроводів як її елементів, компресорних (КС) та газорозподільних станцій (ГРС), пов'язаних між собою складними функціональними залежностями. Тому процес профілактичного обслуговування газотранспортної системи (ГТС) слід розглядати як багатofакторну оптимізаційну задачу в умовах централізованої системи обслуговування.

Розглянемо процес керування технічним станом об'єктів у регіоні централізованого обслуговування системи газопостачання, що включає незалежні і безупинно функціонуючі об'єкти (розглянуті як технічні підсистеми). Під незалежними підсистемами розуміють незалежність їхніх відмов – допущення, що є основним, як правило, при розгляді надійності трубопровідних систем з позиції системного підходу.

Як підсистеми беруться до уваги окремі КС, ГРС, багатониткові ділянки лінійної частини трубопроводів, а також окремі вузли (перемички, запірні арматури).

Географічно централізована система обслуговування ГТС опирається на ряд пунктів, розміщених вздовж траси магістрального газопроводу і обладнаних спеціальною ремонтною технікою, яка дозволяє раціонально проводити роботи з обслуговування різних об'єктів. Збільшення числа опорних пунктів призведе, з одного боку, до прискорення робіт з відновлення технічного стану газотранспортної системи (підвищення експлуатаційної надійності) і до здорожчання процесу обслуговування загалом за рахунок збільшення витрат на їх утримання. Тому має місце оптимізаційна задача вибору раціонального числа опорних пунктів централізованої системи обслуговування і їх розміщення вздовж траси газопроводу. При цьому виникає задача оптимального керування централізованою системою обслуговування, яка повинна за наявності даної кількості технічних засобів і їх розміщення в опорних пунктах забезпечити максимально високу надійність експлуатації ГТС.

Мета задач керування обслуговуванням – складання оптимального графіка планових відновлювальних ремонтів технологічного устаткування на об'єктах зони централізованого обслуговування і ремонту об'єктів ГТС.

При виведенні основних залежностей, що описують процес обслуговування системи і дають змогу одержати оптимальні його показники, використовуються наступні припущення для технологічного устаткування об'єктів системи газопостачання:

1) потік відмов технологічного устаткування є пуассонівським нестационарним. Імовірність появи K відмов на i -му технологічному об'єкті системи газопостачання за час (t_1, t_2) визначиться як:

$$P_K^{(i)}(t_1, t_2) = \frac{[\Lambda_i(t_2) - \Lambda_i(t_1)]}{K!} \times \exp[-\Lambda_i(t_1) + \Lambda_i(t_2)]; \quad (1)$$

2) планові профілактичні роботи на окремих об'єктах системи газопостачання незалежні;

3) тривалість аварійного ремонту ξ_i технологічного устаткування на i -му об'єкті є випадковою величиною з довільною функцією розподілу $G_i(x)$ і з математичним очікуванням $\tau_{cp}^{AP(i)}$;

4) середня тривалість планових попереджувальних ремонтів на i -му об'єкті обслуговування детермінована і стала, тобто $\tau_{cp}^{-np} = const$;

5) порядок організації обслуговування: i -тий експлуатований об'єкт через деякий календарний період часу τ_i після проведення планового ремонту $(i-1)$ -го технологічного об'єкта і триваючого $\tau_{cp}^{-np(i-1)}$, виводиться на плановий ремонт із середньою тривалістю $\tau_{cp}^{-np(i-1)}$ для $i=1$ підсистеми, з номером $(i-1)$ буде m -на підсистема.

У практиці експлуатації основного устаткування газотранспортної системи виділяються два випадки планового обслуговування: а) планові ремонти проводяться при нормально функціонуючому об'єкті включенням резервних блоків; б) планові ремонти пов'язані з порушенням основного технологічного режиму об'єкта обслуговування. Оскільки основні об'єкти системи газопостачання є резервованими, доцільно розглянути перший випадок проведення планових заходів, однак для більшої простоти висновків розглянемо другий випадок, після чого врахуємо специфічні особливості першого підходу.

Оптимальний розклад технологічного обслуговування визначиться з умови вибору значень $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_i, \dots, \tau_m$, що забезпечують екстремум показників якості функціонування комплексу технологічних об'єктів у зоні централізованого обслуговування системи газопостачання.

Як критерій оптимізації системи ремонтів варто використовувати техніко-економічний показник, зокрема середні сумарні питомі витрати на експлуатацію системи. У цьому випадку розв'язок задачі полягає в описі показника середніх сумарних питомих витрат $C(\bar{\tau})$ і зводиться до процедури

$$\min_{\bar{\tau}} C(\bar{\tau}) = C(\bar{\tau}^*), \quad (2)$$

де $\bar{\tau}$ – m -мірний вектор.

Функція мети визначиться із залежності:

$$C(\bar{\tau}) = \frac{\sum_{i=1}^r a_i C}{K_r(\bar{\tau})}, \quad (3)$$

де r – число станів системи газопостачання;

a_i – середні питомі витрати, зв'язані з перебуванням комплексу об'єктів системи газопостачання в i -тому стані;

$K_i(\bar{\tau})$ – коефіцієнт, визначений як частка часу, яку система проводить у i -му стані в стаціонарному процесі обслуговування;

$K_r(\bar{\tau})$ – коефіцієнт готовності системи (комплексу експлуатованих об'єктів) газопостачання загалом.

Якщо припустити, що кожний з територіально розосереджених об'єктів обслуговування може перебувати в трьох станах: справного функціонування, у планово-попереджувальному ремонті (ППР) та аварійному ремонті (АР), то загальне число станів системи газопостачання складе $r = q^m$, де $q = 3$.

Введемо в розгляд випадковий вектор $\eta(t)$, що характеризує стан системи газопостачання в довільний момент часу t ; i -тий компонент $\eta(t)$ ($i = 1, 2, \dots, m$) вектора $\eta(t)$ має реалізацію:

$$\eta(t) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } i - \text{тий об'єкт знаходиться} \\ & \text{в робочому стані } E_1^{(i)}; \\ 2, & \text{якщо на } i - \text{тому об'єкті проводяться} \\ & \text{ППР і він перебуває в стані } E_2^{(i)}; \\ 3, & \text{якщо } i - \text{тий об'єкт системи газо-} \\ & \text{постачання знаходиться в стані АР } E_3^{(i)}. \end{cases}$$

Таким чином, навіть при невеликому m число станів системи загалом є суттєво великою множиною. Число розглянутих станів системи газопостачання можна значно скоротити, якщо врахувати, що регіональна система газопоста-

чання обслуговується однією централізованою базою.

Припустимо, що на централізованій базі обслуговування системи наявна спеціалізована бригада планового обслуговування й аварійна бригада з високою оперативною готовністю, тобто обслуговування є роздільним. Тоді події, що полягають у реалізації станів $E_2^{(i)}$, $i = 1, 2, \dots, m$, – несумісні, що впливає з умови почергового планового обслуговування об'єктів системи. Події, що відповідають станам $E_1^{(i)}$, $E_3^{(i)}$, $i = 1, 2, \dots, m$, – сумісні, так само як і події $E_2^{(i)}$, $E_3^{(i)}$, $i = 1, 2, \dots, m$.

Якщо припустити, що одночасне настання більш двох аварійних відмов технологічних об'єктів у регіоні однієї централізованої бази обслуговування є подією малоймовірною, так само як і проведення планових робіт, коли в системі аварійно вийшло з ладу більше одного об'єкта, число розглянутих станів може бути додатково скорочено.

Припустимо також, що технологічне устаткування на кожному з об'єктів у зоні централізованого обслуговування системи обслуговується за зручною в практичній реалізації і дуже ефективною стратегією технічного обслуговування – стратегією календарного планування [2]. Тоді система загалом повертається у вихідний стан після проведення планових робіт на i -тій підсистемі стосовно її стану в момент закінчення попередніх планових робіт на тій же підсистемі. Отже, випадковий процес зміни станів $\eta(t)$ – процес відновлення з періодом

$$t_p = \sum_{i=1}^m \left(\tau_i + \tau_{cp}^{np(i)} \right), \quad (4)$$

що дає змогу скористатися математичним апаратом теорії відновлення.

З огляду на (3) і (4), а також зроблені допущення про структуру обслуговування, функція мети набуває вигляду:

$$C(\bar{\tau}) = \left[\sum_{i=1}^m a_{np}^{(i)} M \{ T_2^{(i)}(\bar{\tau}) \} + \sum_{i=1}^m a_{AP}^{(i)} M \{ T_3^{(i)}(\bar{\tau}) \} + \sum_{i=1}^m \sum_{K=1}^m \sum_{K>i} (a_{AP}^{(i)} + a_{AP}^{(K)}) M \{ T_3^{(i,K)}(\bar{\tau}) \} + \sum_{i=1}^m \sum_{K=1}^m \sum_{K \neq i} (a_{np}^{(i)} + a_{AP}^{(K)}) M \{ T_{2,3}^{(i,K)}(\bar{\tau}) \} \right] \times \left[M \{ T_1(\bar{\tau}) \} \right]^{-1} \quad (5)$$

де $M \{ T_1(\bar{\tau}) \}$ – математичне очікування (МО) часу безвідмовної роботи системи газопостачання за період відновлення випадкового процесу $\eta(t)$;

$M \{ T_2^{(i)}(\bar{\tau}) \}$ – МО часу перебування i -го об'єкта системи газопостачання в плановому

попереджувальному ремонті при справній роботі інших $m - 1$ експлуатованих об'єктів;

$$M\{T_3^{(i)}(\bar{\tau})\} - \text{МО часу перебування } i\text{-го}$$

технологічного об'єкта в аварійному відновлювальному ремонті при нормальній роботі інших $m - 1$ об'єктів системи;

$$M\{T_3^{(i,K)}(\bar{\tau})\} - \text{МО часу спільного пере-$$

бування i -го і K -го ($K \neq 1$) об'єктів системи газопостачання в аварійному відмовленні при справній роботі інших;

$$M\{T_{2,3}^{(i,K)}(\bar{\tau})\} - \text{МО часу простою } i\text{-го тех-}$$

нологічного об'єкта в плановому ремонті разом з K -м в аварійному ремонті ($K \neq 1$) при нормальній роботі інших $m = 2$ об'єктів системи газопостачання.

Тоді

$$M\{T_1^{(i)}(\bar{\tau})\} = \sum_{i=1}^m \int_0^{\tau_i} \prod_{j=1}^m [1 - \tau_{cp}^{AP(i)} \lambda_j (\xi_{ij} + x)] dx. (6)$$

Середній час перебування i -го експлуатованого об'єкта системи газопостачання в плановому відбудовному ремонті при справному функціонуванні інших об'єктів комплексу визначиться аналогічним чином:

$$M\{T_2^{(i)}(\bar{\tau})\} = \int_0^{\tau_{cp}^{np(i)}} S_i(\theta) d\theta, (7)$$

де $S_i(\theta)$ - імовірність безвідмовної роботи $m - 1$ об'єктів системи в момент θ з інтервалу $(0, \tau_{cp}^{np(i)})$, $i = 1, 2, \dots, m$.

Оскільки остання подія спостерігається при настанні $m - 1$ спільних подій, то

$$S_i(\theta) = \prod_{\substack{j=1 \\ J \neq i}}^m P_{ij}(\theta), (8)$$

де $P_{ij}(\theta)$ - імовірність того, що j -й об'єкт системи газопостачання нормально функціонує у даний момент.

Враховуючи дані припущення, вираз для $P_{ij}(\theta)$ у (8) визначиться аналогічно (5):

$$P_{ij}(\theta) \approx \prod_{\substack{j=1 \\ J \neq i}}^m [1 - \tau_{cp}^{AP(j)} \lambda_j (\xi_{ij} + \tau_i + \theta)]. (9)$$

Підставивши (8) і (9) у (7), одержимо:

$$M\{T_2^{(i)}(\bar{\tau})\} = \int_0^{\tau_{cp}^{np(i)}} \prod_{\substack{j=1 \\ J \neq i}}^m [1 - \tau_{cp}^{AP(j)} \lambda_j (\xi_{ij} + \tau_i + \theta)] d\theta. (10)$$

Аналогічно (4) середній час перебування i -го експлуатованого об'єкта в аварійному ремонті при безвідмовній роботі інших технологічних об'єктів системи газопостачання за період відновлення процесу $\eta(t)$:

$$M\{T_3^{(i)}(\bar{\tau})\} = \int_0^{\tau_i} U_i(t) dt = \sum_{K=1}^m \int_0^{\tau_i} U_i(t) dt, (11)$$

де $U_i(t)$ - імовірність перебування i -го об'єкта в аварійному відновленні (позначимо подію A) при нормальній роботі інших об'єктів системи (події $B_j, J = 1, 2, \dots, m, j \neq 1$).

Оскільки подія A і події B сумісні, то

$$U_i(t) = P_{Ki}^A(t) \prod_{\substack{j=1 \\ J \neq i}}^m P_{Kj}^B(t), \quad K = 1, 2, \dots, m, (12)$$

де $P_{Ki}^A(t)$ - імовірність застати i -тий експлуатований об'єкт у стані аварійного ремонту в момент $t, 0 \leq t \leq \tau_K$;

$P_{Kj}^B(t)$ - імовірність перебування j -го об'єкта обслуговування системи газопостачання в працездатному стані в момент t з інтервалу $(0, \tau_K)$.

Подія A спостерігається при реалізації трьох неспільних подій:

A_1 , що полягає в тому, що до моменту t i -тий технологічний об'єкт зовсім не відмовляв, але аварійне відмовлення настало саме до цього моменту;

A_2 - до моменту t устаткування i -го об'єкта системи відмовляло, але його працездатність була відновлена проведенням аварійних ремонтів і до розглянутого моменту часу t відмовило в черговий раз;

A_3 - i -тий експлуатований об'єкт системи відмовляв і до моменту t його черговий аварійний ремонт ще не закінчився.

Очевидно, $A = A_1 \cup A_2 \cup A_3$. Подія типу A полягає в тому, що при зроблених припущеннях про експлуатоване устаткування системи газопостачання можна вважати, що

$$P_{Ki}^A(t) \approx \tau_{cp}^{AP(i)} \lambda_j (\xi_{Ki} + t), \quad K = 1, 2, \dots, m, (13)$$

де ξ_{Ki} визначається з (4).

Оскільки події B_j ідентичні подіям \bar{A} , $j = 1, 2, \dots, m, J \neq 1$, то

$$P_{Kj}^B(t) \approx 1 - \tau_{cp}^{AP(J)} \lambda_j (\xi_{Ki} + t). (14)$$

Підставивши (10) у (9), з врахуванням (12) і (13) запишемо:

$$M\{T_3^{(i)}(\bar{\tau})\} = (15)$$

$$= \sum_{K=1}^m \tau_{cp}^{AP(i)} \int_0^{\tau_K} \lambda_j (\xi_{Ki} + t) \prod_{\substack{j=1 \\ J \neq i}}^m [1 - \tau_{cp}^{AP(J)} \lambda_j (\xi_{Ki} + t)] dt.$$

C - перебування інших об'єктів системи в справному функціонуванні до цього ж моменту t ;

$$P_J^C(t) \approx 1 + \tau_{cp}^{AP(j)} \lambda_j (\xi_{ij} + \tau_i + t),$$

$$J = 1, 2, \dots, m, j \neq i \neq K.$$

На підставі попередніх висновків

$$M\left\{T_{2,3}^{(i,K)}(\bar{\tau})\right\} = \int_0^{\tau_{cp}^{np(i)}} P_K^B(t) \prod_{\substack{J=1 \\ J \neq i \neq K}}^m P_j^c(t) dt. \quad (16)$$

Для кожного з об'єктів системи можна записати:

$$M\left\{T_2^{(i)}(\bar{\tau})\right\} = \tau_{cp}^{np(i)} - M\left\{T_{2,3}^{(i,K)}(\bar{\tau})\right\};$$

$$M\left\{T_1^{(i)}(\bar{\tau})\right\} = t_p - M\left\{T_3^{(i)}(\bar{\tau})\right\} - M\left\{T_3^{(i,K)}(\bar{\tau})\right\}.$$

Остаточний вираз для функції мети $C(\bar{\tau})$ запишемо підстановкою (6), (10), (15) і (2-10) у (6).

$$C(\bar{\tau}) = \left[\sum_{i=1}^m a_{np}^{(i)} \int_0^{\tau_{cp}^{np(i)}} \prod_{j=1, j \neq i}^m \left\{1 - \tau_{cp}^{AP(j)} \lambda_j(\xi_{ij} + \tau_i + t)\right\} dt + \right. \\ \left. + \sum_{i=1}^m a_{AP}^{(r)} \sum_{i=1}^m \tau_{cp}^{AP(i)} \int_0^{\tau_i} \lambda_r(\xi_{ir} + t) \prod_{j=1, j \neq r}^m \left\{1 - \tau_{cp}^{AP(j)} \lambda_j(\xi_{ij} + t)\right\} dt + \right. \\ \left. + \sum_{i=1}^m \sum_{K=1, K > r}^m \left(a_{AP}^{(r)} + a_{AP}^{(K)}\right) \sum_{i=1}^m \tau_{cp}^{AP(r)} \tau_{cp}^{AP(K)} \int_0^{\tau_i} \lambda_r(\xi_{ir} + t) \lambda_K(\xi_{iK} + t) \times \right. \\ \left. \times \prod_{j=1, j \neq r}^m \left\{1 - \tau_{cp}^{AP(j)} \lambda_j(\xi_{ij} + t)\right\} dt + \sum_{i=1}^m \sum_{K=1, K \neq i}^m \left(a_{np}^{(i)} + a_{AP}^{(K)}\right) \tau_{cp}^{AP(K)} \times \right. \\ \left. \times \int_0^{\tau_{cp}^{np(i)}} \lambda_K(\xi_{iK} + \tau_i + t) \prod_{j=1, j \neq i \neq K}^m \left\{1 - \tau_{cp}^{AP(j)} \lambda_j(\xi_{ij} + \tau_i + t)\right\} dt \right] \times \\ \times \left[\sum_{i=1}^m \int_0^{\tau_i} \prod_{j=1}^m \left\{1 - \tau_{cp}^{AP(j)} \lambda_j(\xi_{ij} + t)\right\} dt \right]^{-1}, \quad (17)$$

де вираз для ξ_{ij} , $i, j = 1, 2, \dots, m$ визначаються з (9).

Як вказувалося раніше, планові відновлювальні ремонти основного устаткування, проведені на ряді об'єктів системи газопостачання, не пов'язані з порушенням технологічного режиму роботи об'єкта, що обслуговується. У цих випадках не виключені можливості настання аварійних відмов і під час проведення власне планового ремонту технологічного устаткування. Тоді події $E_3^{(i)}$ можуть відбуватися на всьому періоді відновлення випадкового процесу $\eta(t)$, що характеризує стан системи.

Отримані залежності дають змогу досліджувати режими обслуговування складної системи газопостачання, що включає m різнотипних, територіально розосереджених, але функціонально взаємозалежних (загальними цілями функціонування) технологічних об'єктів системи газопостачання в регіоні центральної бази технічного обслуговування і ремонту, вони дають змогу розраховувати оптимальний графік планових ремонтів системи газопостачання, що включає m різнотипних розосереджених безупинно функціонуючих технологічних об'єктів.

У випадку обслуговування двох однакових об'єктів системи газопостачання ($m = 2$) розв'язок розглянутої задачі зводиться до оптимізації виду:

$$\min_{\tau_1, \tau_2} C(\tau_1, \tau_2) = C(\tau_1^*, \tau_2^*). \quad (18)$$

У випадку двох однакових підсистем, якщо виконується умова $1 - \tau_{cp}^{AP} \lambda(0) \geq 0$, мінімум функції $1 - K_r(\tau_1, \tau_2)$ досягається при $\tau_1 = \tau_2$. Оскільки для ряду технологічних об'єктів системи газопостачання умова $1 - \tau_{cp}^{AP} \lambda(0) \geq 0$, як правило, виконується, то для експлуатованого устаткування зводиться до

$$\min_{\tau} C(\tau) = C(\tau^*). \quad (19)$$

Тоді з (17) запишемо наступний вираз для функції мети:

$$C(\tau) = \left\{ a_{np} \tau_{cp}^{np} + a_{AP} \tau_{cp}^{AP} \times \right. \\ \left. \times \left[\Lambda(\tau + \tau_{cp}^{np}) + \Lambda(\tau) + \Lambda(2\tau + \tau_{cp}^{np}) \right] \right\} \times \\ \times \left\{ \tau - \tau_{cp}^{AP} \left[\Lambda(\tau) + \Lambda(2\tau + \tau_{cp}^{np}) + \right. \right. \\ \left. \left. + \tau_{cp}^{AP} \int_0^{\tau} \lambda(t) \lambda(\tau + \tau_{cp}^{np} + t) dt \right] \right\}^{-1}. \quad (20)$$

Рівняння для визначення локальних екстремумів показника якості обслуговування в розглянутій системі визначиться з умови $dC(\tau) / d\tau$.

$$2\lambda(2\tau + \tau_{cp}^{np}) \left\{ \tau - \tau_{cp}^{AP} \left(\int_0^{\tau} \lambda(t) dt + \int_0^{\tau} \lambda(\tau + \tau_{cp}^{np} + t) dt - \right. \right. \\ \left. \left. - \tau_{cp}^{AP} \int_0^{\tau} \lambda(t) \lambda(\tau + \tau_{cp}^{np} + t) dt \right) \right\} \times \left\{ 1 - \tau_{cp}^{AP} \left[\lambda(\tau) - \right. \right. \\ \left. \left. - \lambda(2\tau + \tau_{cp}^{np}) + 2\lambda(2\tau + \tau_{cp}^{np}) - \tau_{cp}^{AP} \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \left(2\lambda(\tau) \lambda(2\tau + \tau_{cp}^{np}) - \lambda(\tau) \lambda(\tau + \tau_{cp}^{np}) + \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. + \lambda'(\tau) \int_0^{\tau} \lambda(\tau + \tau_{cp}^{np} + t) dt \right) \right] \right\}^{-1} - \\ - \left[\int_0^{\tau} \lambda(t) dt + \int_0^{\tau_{cp}^{np}} \lambda(\tau + t) dt + \int_0^{\tau} \lambda(\tau + \tau_{cp}^{np} + t) dt \right] = \\ = \frac{a_{np} \tau_{cp}^{np}}{a_{AP} \tau_{cp}^{AP}}.$$

Розв'язком (20) може бути безліч значень $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_i, \dots, \tau_m$, яким функція лівої частини $\psi(\tau)$ стає рівною значенням правої частини:

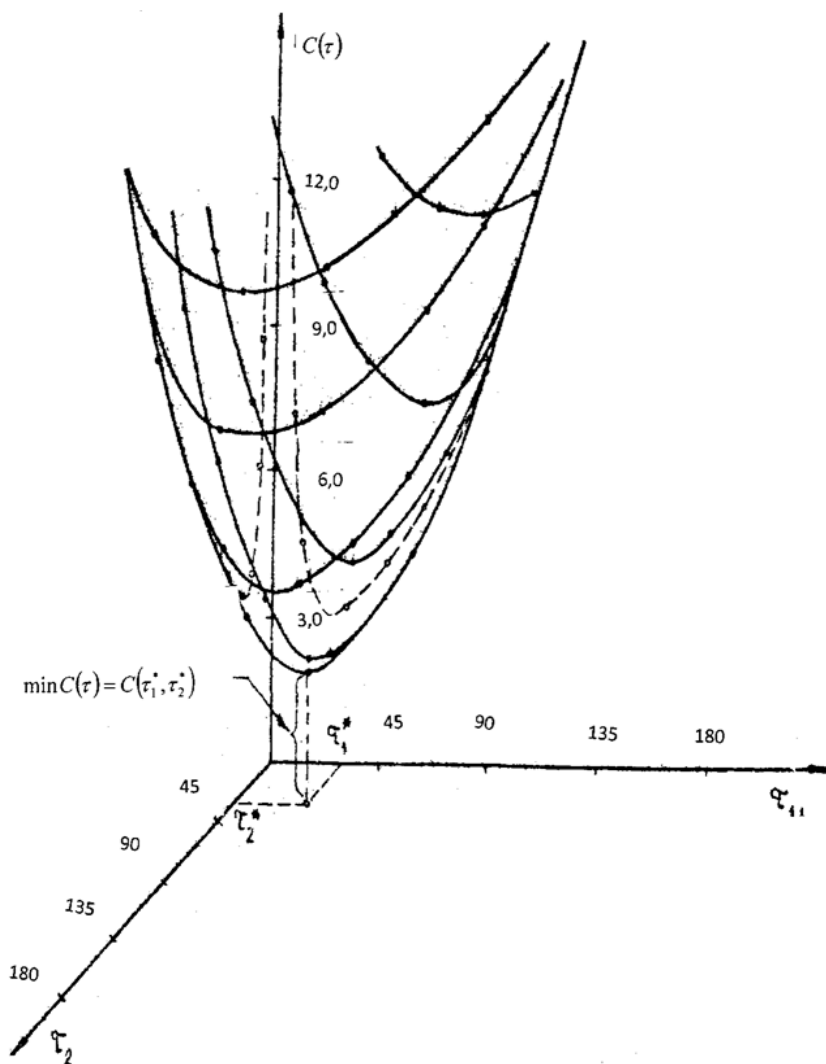


Рисунок 1 – Показники обслуговування і ремонту двох ГРС, розглянутих як єдиний комплекс

$$\frac{a_{np} \tau_{cp}^{-np}}{a_{AP} \tau_{cp}^{AP}} = const .$$

Оптимальні показники якості обслуговування обох об'єктів системи газопостачання - періодичність планових ремонтів і відповідне мінімальне значення середніх сумарних питомих витрат на експлуатацію - визначаються для значення $\tau_i = \tau^*$, при цьому досягається глобальний екстремум функції мети $C(\tau) \rightarrow C(\tau^*)$.

Якщо глобальний екстремум функції мети $C(\tau)$ досягається для значень аргументу $\tau^* = \infty$, це означає, що проведення планових ремонтів технологічного устаткування на експлуатованих об'єктах системи газопостачання недоцільне. У цьому випадку розв'язок матиме вигляд:

$$C(\infty) = \frac{a_{AP} \tau_{cp}^{AP}}{\tau_{cp}} . \quad (22)$$

Оскільки система складається з двох незалежно функціонуючих підсистем, функція розподілу часу безвідмовної роботи системи загалом $F(x)$, необхідна для визначення τ_{cp} у (22), визначиться як

$$F(x) = F_1(x) * F_2(x) , \quad (23)$$

тобто є композицією функцій розподілів часу безвідмовної роботи обох об'єктів обслуговування системи.

Оскільки в даному випадку розглядаються однакові об'єкти обслуговування, то

$$F(x) = \int_0^{\infty} f(x-z) f(x) dx , \quad (24)$$

де $f(t)$ - щільність розподілу часу безвідмовної роботи кожної з підсистем; $f(t) = dF_i(t) / dt, i = 1, 2$.

На рисунку 1 зображено графік функції середніх сумарних питомих витрат $C(\bar{\tau})$ на обслуговування і ремонт двох однакових ГРС, розглянутих як єдиний комплекс.

Література

Слід зазначити, що показник середніх сумарних питомих витрат на експлуатацію виро-джується в середні питомі втрати.

Як бачимо, імовірність перебування системи в стані аварійної відмови одночасно двох об'єктів обслуговування і пов'язані з ними втрати – значення C_3 - дуже малі щодо інших станів і втрат, що викликаються їхньою реалізацією. Ця обставина є визначальною для розглянутих об'єктів системи газопостачання, що володіють високою працездатністю. Аналіз процесу обслуговування системи газопостачання, що включає різні за чисельністю і характеристиках ГРС і ГРП, не змінює це уявлення про відносне кількісне співвідношення втрат $C_1 - C_5$.

Аналізовані стратегії обслуговування й отримані залежності дають змогу розраховувати оптимальні показники процесу обслуговування і ремонту основного устаткування системи газопостачання в рамках кожної зі стратегій - календарна періодичність τ^* , напрацювання θ^* стан K^* до планових попереджувальних ремонтів, а також відповідні екстремальні значення показника якості обслуговування і ремонту $C(\tau^*)$, $C(\theta^*)$ чи $C(K^*)$. У практиці експлуатації систем газопостачання через різні причини іноді виникають проблеми, пов'язані з дотриманням оптимальних графіків планових ремонтів. Тому доцільно враховувати й оцінювати можливості і наслідки перенесення чергового планового профілактичного ремонту. При цьому виникають дві типові ситуації.

1. Дострокове проведення профілактичного ремонту бажано в тому випадку, якщо виникає відмова експлуатованого устаткування, оптимальний термін якого наблизився до значень τ^* , θ^* або K^* . Іноді доцільно не тільки усунути виниклу відмову, але і провести поза-чергові регламентні роботи.

2. Відтягування терміну початку планових попереджувальних заходів, коли до оптимального моменту τ^* , θ^* або K^* не існує достатніх умов для їхнього проведення: відсутні резервне устаткування, чи запчастини достатня оперативна готовність ремонтних бригад або виникали різні розуміння оперативно-управлінського характеру.

У практиці експлуатації систем газопостачання профілактичні допуски для різного типу устаткування і різних експлуатаційних умов визначаються на підставі виробничого досвіду обслуговуючого персоналу. У теоретичних і прикладних дослідженнях організації ремонтного обслуговування устаткування систем газопостачання профілактичні допуски задаються заздалегідь. Значення Δ_1 і Δ_2 можна вибирати в границях 10...15% відповідних номінальних розрахункових чи нормативних значень.

1 Грудз В.Я. Обслуговування і ремонт газопроводів / Грудз В.Я., Тимків Д.Ф., Михалків В.Б., Костів В.В. – Івано-Франківськ: Лілея-НВ, 2009. – 712 с.

2 Бразилевич Е.Ю. Некоторые математические вопросы теории обслуживания сложных систем / Бразилевич Е.Ю., Каштанов В.А. – М.: Сов.радио, 1971. – 122 с.

3 Бусленко Н.П. Моделирование сложных систем / Бусленко Н.П.. – М.: Наука, 1978. – 421 с.

4 Керування режимами газотранспортних систем / В.Я.Грудз, М.Т.Літчевський, В.Б.Михалків та ін. – К.: Укргазпроект, 1996. – 140 с.

5 Мазур И.И. Безопасность трубопроводных систем / Мазур И.И., Иванцов О.М. – М.: ИЦ «ЕЛИМА», 2004. – 1104 с.

6 Ornyak I.V., Likhman I.V. The spring splines procedure with prescribed accuracy for determination of the curvatures of the pipeline based on the 3-D measurements of its position // Rio Pipeline Conference & Exposition 2011, IBP1029_11.

7 Fun Chen. New approach developed for estimating pour points of grucle oil blend / Fun Chen, Jinjun Zhang, Fan Zhang. // Oil S Gas Journal. – 2003. – №11. – p. 60-64.

Стаття надійшла до редакційної колегії
30.08.18

Рекомендована до друку
професором **Середюк М.Д.**
(ФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)
д-м техн. наук **Говдяком Р.М.**
(ІК «МАШЕКСПОРТ», м. Київ)

ПОКРАЩЕННЯ БЕЗПЕКИ ПРАЦІ НА ТЕРИТОРІЯХ НАФТОГАЗОВИХ ОБ'ЄКТІВ ПІДВИЩЕННЯМ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ ВОДЯНОГО ПОЖЕЖОГАСІННЯ

О. М. Волошенко, В. Г. Погребняк, М. П. Кулик, А. В. Погребняк, М. П. Школьний, І. В. Перкун

ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. +38 050 1351545,
e-mail: pogrebnyak.av@gmail.com

Проаналізовано умови праці співробітників рятувальних служб та оперативного персоналу під час пожежі, коли відкритий вогонь є одним із небезпечних факторів, особливо на територіях нафтогазових об'єктів. Він вважається також досить важливим екологічним чинником, який за певних умов призводить до погіршення умов праці не тільки оперативного персоналу конкретного об'єкту, а також до сильного забруднення довкілля. Особливо це стосується пожежників, рятувальників та інших працівників служби цивільного захисту, які піддаються в процесі ліквідації аварійних ситуацій шкідливій дії високої температури, теплового випромінювання, а також небезпечних легких продуктів горіння. Поліпшення умов праці під час аварійно-рятувальних робіт можливо досягти шляхом скорочення часу їх проведення, а також збільшення відстані від рятувальника до осередку займання. Досягти цього можна використанням в системах пожежогасіння вогнегасних розчинів додаванням поверхнево-активних речовин та полімерів. Ці речовини вводяться в пожежні рукави та трубопроводи, що дає змогу збільшити витрату вогнегасного розчину, дальність вихідного струменя із пожежного ствола та зменшити час проведення операції по гасінню пожежі. Проведені експерименти в лабораторних умовах дозволили підібрати найбільш ефективний полімер – поліетиленоксид, його молекулярну масу та концентрацію розчину, при яких забезпечується максимально можливе зменшення гідродинамічного опору пожежного рукава та пожежного ствола.

Ключові слова: поліетиленоксид, поверхнево-активні речовини, зменшення гідралічного опору, збільшення витрати вогнегасної речовини, дальність вихідного струменя, пожежний ствол.

Проведен анализ условий труда сотрудников спасательных служб и оперативного персонала при тушении пожара, когда открытый огонь является одним из опасных факторов, особенно на территориях нефтегазовых объектов. Он считается также довольно важным экологическим показателем, который при определенных условиях приводит к ухудшению условий труда не только оперативного персонала определенного объекта, но и к существенному загрязнению окружающей среды. Особенно это касается пожарников, спасателей и других работников службы гражданской защиты, которые подвергаются в процессе ликвидации аварийных ситуаций вредному воздействию высокой температуры, тепловому излучению, а также вредных продуктов горения. Улучшения условий труда при аварийно-спасательных работах можно достичь путем сокращения времени их проведения, а также увеличения расстояния от спасателя к очагу загорания. Это достигается при использовании в системах пожаротушения водных растворов поверхностно-активных веществ и полимеров. Эти вещества вводятся в пожарные рукава и трубопроводы, что позволяет увеличить расход огнегасящего вещества, дальность выходной струи из пожарного ствола, а также уменьшит время проведения операции тушения. Проведенные эксперименты в лабораторных условиях позволили подобрать наиболее эффективный полимер – полиэтиленоксид, его молекулярную массу и концентрацию раствора, при которых обеспечивается максимально возможное снижение гидродинамического сопротивления пожарного рукава и пожарного ствола.

Ключевые слова: полиэтиленоксид, поверхностно-активные вещества, снижение гидравлического сопротивления, увеличение расхода огнегасящего вещества, дальность выходной струи, пожарный ствол.

An analysis of working conditions of rescue service and operational personnel during a fire has been conducted, when open fire is one of the dangerous factors, especially at the oil and gas object territories. It is also considered to be quite an important environmental factor, which under certain circumstances leads not only to deterioration of working conditions of operational personnel at a particular facility, but also to severe environmental pollution. This is especially true of firefighters, rescuers and other civil protection workers who are subjected to harmful effects of high temperature, thermal radiation, as well as hazardous combustion products while eliminating emergency situations. Improvement of working conditions during emergency rescue operations can be achieved by reducing their conduct time, as well as by increasing a distance between a rescuer and ignition point. This can be achieved by using fire extinguishing solutions with additives of surface active agents and polymers in fire suppression systems. These substances are introduced into fire hoses and pipelines, which allows to increase the expense of extinguishing solution, flow range from the jet nozzle and reduce duration of fire suppression operation. The laboratory conducted experiments allowed to select a specific polymer - polyethylene oxide, its molecular weight and solution concentration, which provides the maximum possible reduction of hydraulic resistance in a fire hose and a jet nozzle.

Key words: polyethylene oxide, surface active agents, reduction of hydraulic resistance, increase of extinguishing agent's expense, range of jet flow.

Вступ. Згідно з діючою на даний момент загальнодержавною соціальною програмою поліпшення стану безпеки, гігієни праці та виробничого середовища на 2014-2018 роки, яка прийнята Верховною Радою України (див. ЗУ від 4 квітня 2013 року № 178-VII), передбачено комплексне розв'язання проблем охорони праці, забезпечення безпечних і здорових умов праці на виробництві. Особливо це стосується пожежників, рятувальників та інших працівників служби цивільного захисту, які піддаються в процесі ліквідації аварійних ситуацій шкідливій дії відкритого вогню, особливо на територіях нафтогазових об'єктів. Концептуальні положення стану охорони праці ґрунтуються на аналізі сучасних тенденцій науково-технічного прогресу. Одним із методів покращення стану безпеки, гігієни праці та виробничого середовища на територіях нафтогазових об'єктів є підвищення ефективності роботи різних технологічних систем, які забезпечують охорону праці. Все це, в першу чергу, повинно відноситися до систем (установок) гасіння пожеж.

Відкритий вогонь, як небезпечний фактор пожежі, вважається також найважливішим екологічним чинником, який при поєднанні певних умов призводить до сильного забруднення довкілля і є важливою проблемою при вирішенні цілого ряду завдань з цивільного захисту. Тому підвищення ефективності роботи систем пожежогасіння є найважливішим інженерно-технологічним заходом, що дозволяє зменшити забруднення навколишнього середовища продуктами згоряння та підвищити рівень безпеки на об'єктах нафтогазової галузі. Підвищити ефективність роботи систем водяного пожежогасіння, яке є найпоширенішим та легко реалізується на територіях нафтогазових об'єктів, можна за рахунок зменшення гідродинамічного опору пожежних рукавів або стаціонарних трубопроводів пожежних систем.

Аналіз публікацій та висвітлення невирішених раніше проблем. Експериментально виявлено [1–7], що дуже малі концентрації розчиненого полімеру (декілька ppm), можуть понизити опір тертя в турбулентному потоці до однієї четвертої величини опору чистого розчинника. Оскільки в'язкість цих розчинів практично не відрізняється від в'язкості чистого розчинника, то факт зниження турбулентного тертя здається дивним гідромеханіку.

При турбулентній течії в трубах зниження опору досягає свого максимального значення для даної труби і швидкості течії при певній оптимальній концентрації для даної молекулярної маси полімеру. Максимальні величини зниження опору для розчинів більшості високомолекулярних полімерів виявляються приблизно однаковими, проте, чим більша молекулярна маса полімеру, тим менша величина оптимальної концентрації, при якій спостерігається максимальне зниження опору. Максимально можлива величина зниження гідродинамічного опору – близько 80 % [3, 6].

Вивчення значної кількості речовин, здатних знижувати опір, показало, що опір знижується у випадку таких умов: потік турбулентний, молекулярна маса полімеру – не менше $5 \cdot 10^4$, полімер гнучколанцюговий та розчинний у воді. Багато природних та синтетичних полімерів задовольняють цим умовам і ефективно знижують опір. Наприклад, поліетиленоксид, поліакриламід, гуарова смола, різні полісахариди та багато інших полімерів. Як показують наявні дані, поліетиленоксид є у цьому відношенні найбільш ефективним полімером [3–7]. Щоб понизити гідродинамічний опір води на 65 % за критерію Рейнольдса $Re = 2 \cdot 10^4$ досить мати концентрацію 0,002 % поліетиленоксиду молекулярною масою $6 \cdot 10^6$ [6]. Це означає, що для перекачування 300 м^3 води із зниженим опором на 65 % трубами протипожежного водопостачання знадобиться полімеру близько 2 кг. У той же час, якщо використовувати поліетиленоксид молекулярною масою $5 \cdot 10^5$, то для тих же цілей знадобиться полімеру у 25 разів більше.

Гасіння пожеж – один із найбільш важливих прикладів використання ефекту зниження гідродинамічного опору при течії розбавлених розчинів полімерів. У США [7] і колишньому СРСР [8] є досвід роботи пожежних машин і систем, забезпечених устаткуванням для введення готових розчинів полімерів у пожежні рукави та протипожежні трубопроводи. Є інші відносно ефективні методи введення полімерних добавок у потік, наприклад, у вигляді суспензій або спеціальних патронів [9].

Проаналізуємо можливі переваги використання зниження опору тертя при течії розчинів полімерів у гідравлічних системах протипожежної техніки при гасінні пожеж на територіях нафтогазових об'єктів. З цією метою розглянемо загальний опис максимально можливого зниження опору при течії розбавлених розчинів полімерів і пов'язаних з цим переваг. До останніх відноситься зниження потужності привода насосів, можливість подачі води на великі відстані, використання довгих пожежних шлангів або шлангів меншого діаметра і маси, а також збільшення швидкості подачі води. Крім того, струмין розчину полімеру концентрується у меншому поперечному перерізі і, відповідно, зменшується його вітрове руйнування. Всі ці чинники дуже важливі при гасінні пожеж на складних об'єктах, в тому числі на об'єктах нафтогазового комплексу.

Для типових умов при гасінні пожежі на територіях нафтогазових об'єктів ефективність подачі води визначається такими основними змінними: довжина пожежного шланга, середня швидкість потоку, внутрішній діаметр шланга, витрата вогнегасного агента, втрати напору внаслідок тертя:

– економія потужності привода насоса при фіксованих довжині, внутрішньому діаметрі пожежного рукава та витраті. Опускаючи теоретичні і напівемпіричні викладення, вкажемо лише основні кінцеві результати. Виходить, що продуктивність насоса, яка втрачається унаслідок

док тертя, для $Re = 10^5 - 10^6$ може бути понижена приблизно на 80 %. При сталій продуктивності насоса зменшення гідродинамічного опору брендспойта можна використати для подачі води на значну висоту і більшу відстань. Так, наприклад, при діаметрі рукава $5 \cdot 10^{-2}$ м та витраті $0,02 \text{ м}^3/\text{с}$ (для $Re = 5 \cdot 10^5$) зниження опору тертя в рукаві завдовжки 30 м складе близько 30 %. Відповідно, при цьому відбуватиметься збільшення максимальної відстані подачі полімерного розчину, яка у горизонтальному напрямі може виявитися удвічі більшою ніж для води.

– збільшення довжини рукава при фіксованих витраті, втраті напору унаслідок тертя та діаметрі рукава. Якщо числа Рейнольдса більші за 10^5 , то довжина рукава може бути збільшена приблизно на 500 %.

– збільшення витрати рідини, що використовується під час вогнегасіння, при фіксованих втратах напору, довжині та діаметрі рукава. Розрахунок, підтверджений експериментом, показує, що витрата рідини може збільшитися в 1,8–2 рази.

– зменшення діаметра рукава при фіксованих витраті, втраті напору та довжині рукава. Виходить, що діаметр рукава може бути зменшений на 30 %, а маса рукава на одиницю довжини – приблизно на 50 %, якщо товщина стінки рукава визначається розтягуючим напруженням в стінці.

Подібний розрахунок можна провести і для можливості зменшення діаметра труб пожежного трубопроводу. Розрахунок також показує, що введення полімерних домішок в трубопровід протипожежного водозабезпечення при пожежах може бути істотним методом збільшення об'єму рідини, що подається в осередок пожежі.

Серед відомих методів штучної дії на приграничний шар пожежних рукавів і трубопроводів протипожежного водопостачання з метою зниження гідродинамічного опору метод подачі розчинів полімерів є майже єдиним, в області розробки якого досягнутий певний практичний прогрес. Дослідження показали, що введення у вогнегасну рідину (вода, водні розчини поверхнево-активних речовин) незначних домішок поліетиленоксиду і поліакриламідів дозволяє значно (~75%) знизити гідродинамічний опір [6, 10, 11].

Згадане зниження гідродинамічного опору дозволяє при збереженні решти параметрів гідравлічних систем, або збільшити в 1,5–2 рази витрату рідини, що використовується при пожежогасінні або збільшити в 3–5 разів довжину пожежних рукавів (трубопроводів), або на 60–75 % зменшити споживану насосами потужність, або на 15–20 % зменшити діаметр пожежних рукавів і трубопроводів. Окрім цього, встановлено, що додавання полімерів у воду і розчини ПАР істотно покращують вогнегасну їх здатність [11].

Проведені у цьому напрямі дослідження стосувалися гідродинаміки розчинів полімерів у трубопроводах та питань вдосконалення конструкції змішувачів, тоді як питанням гід-

родинаміки полімерних розчинів в елементах систем введення полімерів у пограничний шар пожежних рукавів (трубопроводів) не приділялося належної уваги. Вважається, що при протіканні розчинів полімерів крізь щілини та інші елементи систем введення істотні “аномалії”, які могли б значно вплинути на ефект Томса, не можуть спостерігатися. Такий вивід виходить з аналізу даних, отримуваних при дослідженні зсувних ламінарних течій, для яких ефекти пружних деформацій незначні. У системах же введення, як правило, реалізується складна течія, що складається з суперпозиції зсувного і переважно повздовжнього (з розтягуванням) течій. При такій складній течії ефекти пружних деформацій стають настільки великі, що нехтування ними у більшості випадків призводить до того, що потенційні можливості полімерних домішок використовуються неповністю, особливо це повинно проявлятися при великих швидкостях течії рідини з полімерними домішками, що використовується у пожежогасінні.

Нерозуміння процесів, що відбуваються в системах введення полімерного розчину в пограничний шар трубопроводів чи пожежних рукавів, викликаних наявністю пружних деформацій, часто породжує масу непорозумінь та помилок при інтерпретації експериментальних результатів.

Мета дослідження. Встановити закономірності прояву пружних деформацій при течії розчинів полімерів в умовах, характерних для внутрішньої задачі стосовно пожежного рукава та трубопроводу протипожежного водопостачання, необхідних для розробки високоефективних пристроїв подачі розчинів полімерів в рідину, що використовується у пожежогасінні на територіях нафтогазових об'єктів.

Матеріали і методи. Були досліджені водні розчини ПЕО з молекулярною масою $2 \cdot 10^6$ та $4 \cdot 10^6$. Концентрація полімеру змінювалася від 0 до 0,3 %, температура – від 4 до 95 °С (основна частина експериментів проведена при 25°С). Розчини з полімером, що повністю розчинився, готували в темному посуді, розчиняючи наважки спирто-полімерної суспензії у дистильованій воді, при кімнатній температурі протягом 2–3 діб, періодично перемішуючи їх шляхом похитування посудини або шляхом розбавлення раніше приготованих розчинів полімеру (0,1 %, 0,2 % і 0,5 %) протягом 7–8 діб до потрібної концентрації. Оскільки водні розчини ПЕО і ПАА (а також і інших полімерів) значно міняють свої властивості при тривалому зберіганні, заздалегідь були вивчені закономірності процесу старіння їх у воді і підібрані стабілізатори, що його виключають. Як стабілізатор використовували 0,05 % домішку йодистого калію в розчини ПЕО і ПАА, який практично повністю виключає старіння цих полімерів у воді при зберіганні і не впливає на їх гідродинамічну активність [12].

Значення молекулярних мас зразків ПЕО були оцінені методом віскозиметрії з викорис-

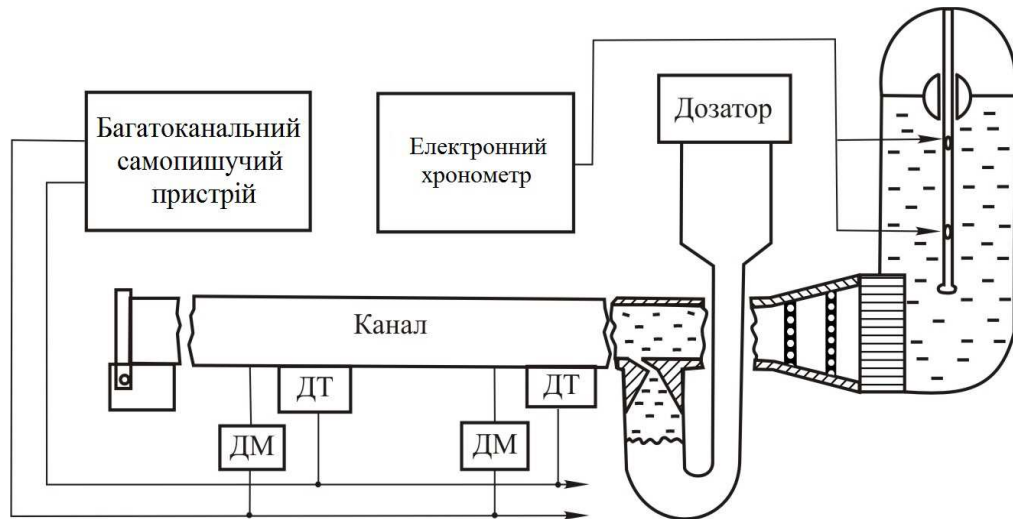
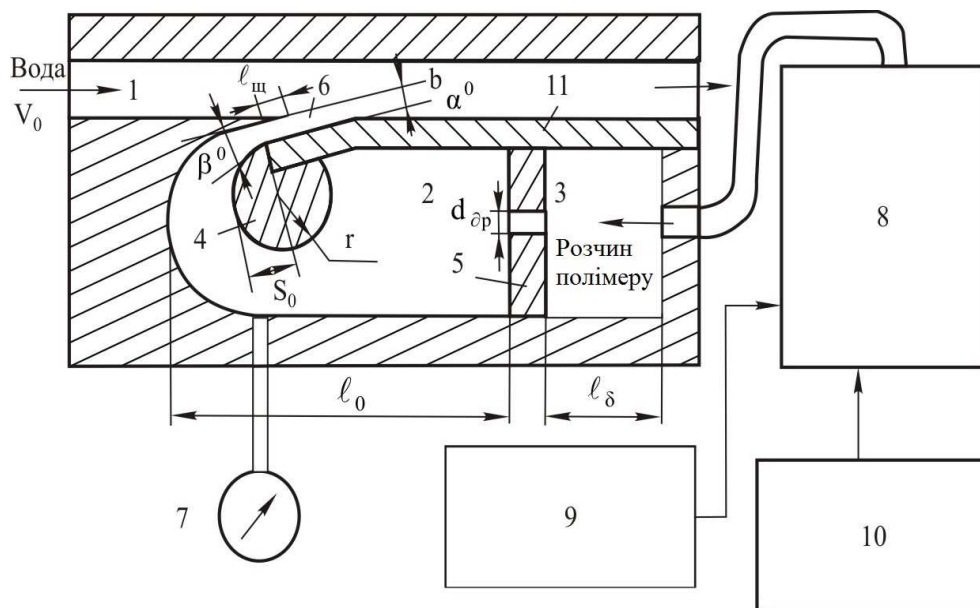


Рисунок 1 – Схема гідростенда



1 – проточна ділянка каналу, в який інжектуються розчин полімера, 2 – підцилінна камера, 3 – буферна камера, 4 – вставка для зміни геометрії входної області (кута входу) щілини, 5 – пластина із дросельними отворами, 6 – вихідна щілина, 7 – манометр, 8 – ємність для розчину полімера, 9 – пристрій для визначення часу витікання заданого об'єму рідини (водного розчину полімера), 10 – моностат, 11 – пластина

Рисунок 2 – Система інжекції полімера в приграничний шар

танням при розрахунках рівняння Марка-Куна-Хаувінка [5]:

$$[\eta]_0 = 1,25 \cdot 10^{-4} M^{0,78} \quad \text{для } M > 3000.$$

В експериментах використовували спеціальний гідродинамічний (рис. 1) стенд [1, 6], що має наступні основні характеристики: діапазон швидкостей витікання води через канал – 5–35 м/с; діапазон чисел Рейнольдса 10^5 – 10^6 ; максимальне дотичне напруження, що реалізується, на стінці – 850 н/м^2 . Канал мав поперечний переріз $(4 \times 4) \cdot 10^{-2} \text{ м}$ та довжину 8,5 м. Відстань між конфузorzом та щілиною, розташованою впоперек нижньої горизонтальної стінки каналу, складала 0,56 м. Отвори діаметром $5 \cdot 10^{-4} \text{ м}$ для вимірювання тиску та давачі сили тертя розташовувалися на нижній стінці каналу.

Система інжекції (рис. 2) складалася з дозатора, підцилінної камери з різними вставками. Вставки призначені для зміни умов деформації полімерного розчину (кута входу) у входній області щілини.

Виклад основного матеріалу. Досліди, описані нижче, були поставлені з метою встановлення закономірностей прояву пружних деформацій при течії розчинів полімерів в умовах, характерних для внутрішньої задачі стосовно пожежних рукавів і трубопроводів.

На рис. 3 наведено експериментальні дані, що характеризують особливості течії водних розчинів поліетиленоксиду в підцилінній камері. Видно, що для таких течій характерні явища, не властиві чисто в'язким середовищам.

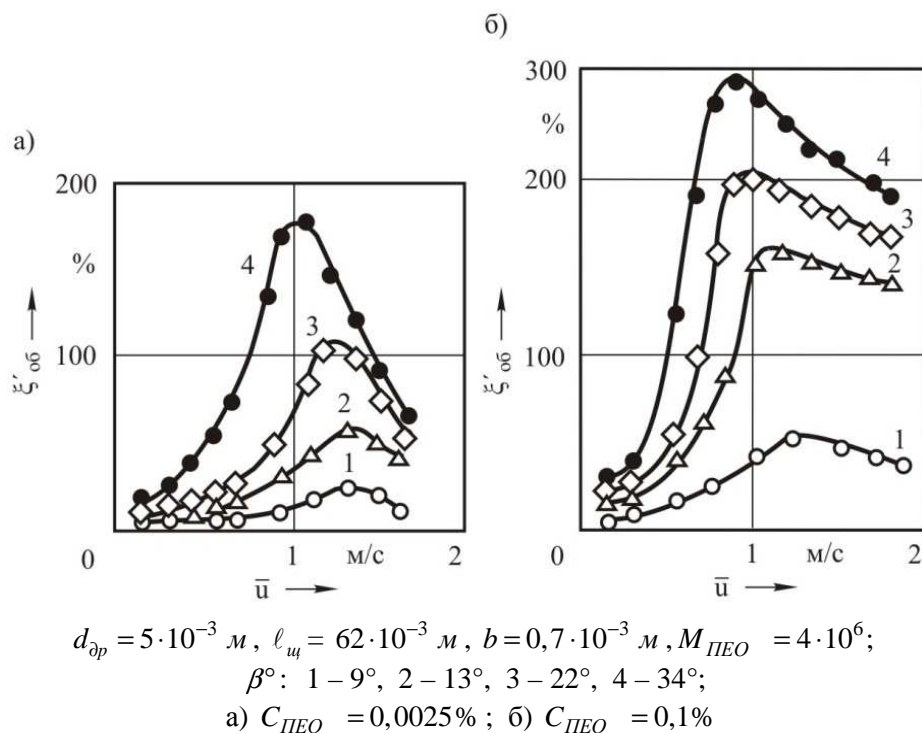


Рисунок 3 – Вплив швидкості витікання та кута входу у щілину на відносний перепад тиску при інжекції водних розчинів ПЕО

При деяких критичних (порогових) значеннях середньої швидкості витікання $u_{кр}$ відносний перепад тиску ξ починає значно зростати, причому тим більше, чим вища концентрація полімеру в розчині. Відмічений характер залежності $\xi = f(u)$ свідчить про високу дисипацію енергії при протіканні розчинів полімерів через інжектор, тобто спостерігається підвищений гідродинамічний опір на надкритичних швидкостях течії.

Розглянуті експериментальні дані узгоджуються з результатами, отриманими при дослідженні течії полімерних розчинів у модельних умовах елементів систем вводу (через короткі капіляри і щілини). Такі течії детально вивчені в роботах [1,13]. Тут же відзначимо найважливіші моменти прояву ефектів пружних деформацій при течії з розтягом розчинів полімерів. Перехід до режиму течії з підвищеною дисипацією енергії супроводиться утворенням вхідного затопленого струменя у вигляді “шнура” або “стрічки”, який оточений вторинними течіями у вигляді тороподібного вихора. При надкритичному режимі течії для області концентрацій, що знаходяться між дуже розбавленими і помірно концентрованими розчинами полімерів, відбувається вельми сильна деформаційна дія гідродинамічного поля на молекулярні ланцюги. Ступінь розгорнутості полімерного ланцюга досягає 60–65 %. У напіврозбавлених і помірно концентрованих розчинах полімерів час релаксації розгорнутих ланцюгів і слабдеформованих індивідуальних ланцюгів розрізняється більш ніж на 2 порядки. Причиною настільки довгого часу згортання є генерування під дією гідродинамічного поля в

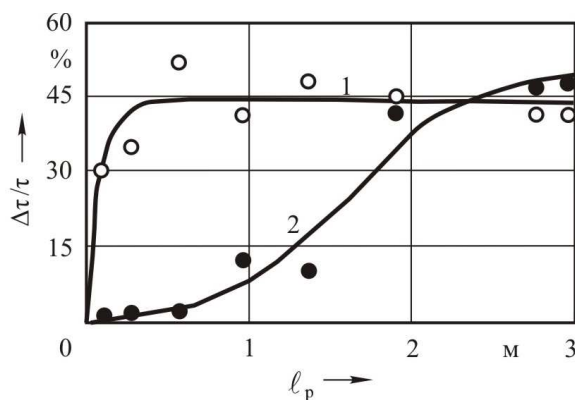
полімерному розчині надмолекулярних структур [13]. Остання обставина повинна істотним чином відбитися на зниженні турбулентного тертя, якщо час існування надмолекулярних утворень, що виникають в полімерному розчині у момент підведення його в приграничний шар, відповідає часу перебування (в обтічній поверхні) в пожежному рукаві.

Результати стосовно інжекції з використанням підщільної камери зі змінним кутом входу (рисунок 3) свідчать, що найефективнішим є підведення полімерного розчину з мінімальним кутом входу $7,8^\circ$ на внутрішню поверхню пожежного рукава. У цьому випадку величина ефекту зниження гідродинамічного опору у 2 рази перевищує величину, отриману при такій же витраті полімеру ($Q > Q_{кр} = 7 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$) на щілині з кутом розкриття 165° . А при швидкості інжекції нижче $Q_{кр}$ загальні втрати тиску практично не залежать від кута входу.

На рис.4 наведено результати, що відображають зменшення дотичного напруження тертя по довжині каналу за місцем введення полімеру. Для випадку, коли полімерний розчин підводився в пожежний рукав на докритичних режимах течії ($\beta^\circ = 7,8^\circ$), зниження дотичного напруження тертя виявляється практично відразу ж за місцем введення полімеру в потік, про що свідчить крива 1. На надкритичних режимах протікання полімерного розчину крізь підщільну камеру ($\beta^\circ = 165^\circ$) відбувається запізнювання прояву гідродинамічної активності полімеру (крива 2).

Слід зазначити, що розподіли дотичного напруження та відносних втрат тиску по довжині каналу корелюються між собою.

З рисунка 4 видно, що зміна режиму протікання полімерного розчину крізь підщілинну камеру від слабодисипативного до сильнодисипативного за рахунок змін умов входу призводить до пониження загального ефекту зниження опору тертя (на триметровій ділянці обтічної поверхні) майже у 2 рази. Ці дані дозволяють також стверджувати, що роль області із зниженою гідродинамічною активністю введеного в приграничний шар полімеру тим значніша, чим менша довжина пожежного рукава. Візуалізація течій полімерного розчину в підщілинній камері свідчить, що умови входу впливають на зниження гідродинамічного опору лише у тому випадку, коли спостерігається втрата стійкості течії, обумовлена, як було показано [13], утворенням динамічних надмолекулярних структур, що призводять до різкого збільшення дисипативності течії.



$M_{ПЕО} = 2 \cdot 10^6$, $C_{ПЕО} = 0,3\%$, $V_0 = 16,5$ м/с,
 $Q = 5 \cdot 10^{-5}$ м³/с;
 $\beta^\circ: 1 - 7,8^\circ, 2 - 165^\circ$

Рисунок 4 – Вплив кута входу в щілину на розподіл дотичних напружень вздовж нижньої стінки каналу при інжекції водних розчинів ПЕО

Збільшення швидкості течії V_0 води, як і слід було чекати, призводить до розширення області із зниженою гідродинамічною активністю полімеру. Це легко пояснити, якщо пригадати, що час існування структур, що утворилися, в умовах розтягуваної течії складає 0,1–0,2 с і більше [1, 13]. Це час, протягом якого полімер, що вийшов з щілини, характеризується пониженою активністю, обумовленою його пам'яттю. Очевидно, що, чим більша буде швидкість основного потоку, тим більша область за щілиною заповниться полімерним розчином у цьому стані, а її розміри можна оцінити як $\ell_\lambda = \theta_{св} \cdot V_0$, де $\theta_{св}$ – час структурної релаксації надмолекулярних утворень. Тоді, наприклад, для швидкості течії води (набігаючого потоку) 25 м/с ця область повинна поширитися вниз по потоку до 2,5 м, якщо $\theta_{св}$ рівне 0,1 с. Оцінні розміри області зниженої гідродинамічної активності полімеру цілком узгоджуються з отриманими експериментально результатами.

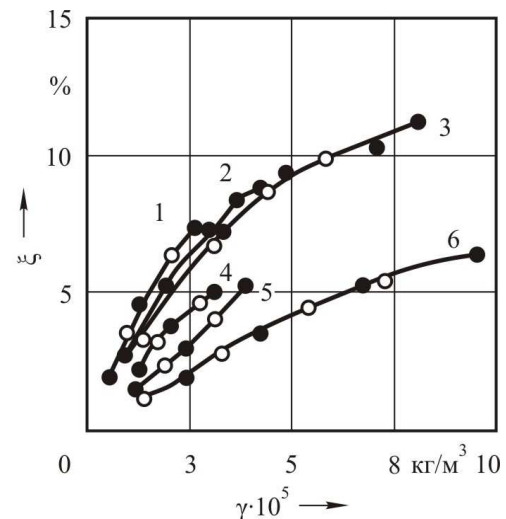
Дослідження залежності загальних втрат тиску в каналі від швидкості основного потоку показали, що зміна кута входу підщілинної камери з $14,5^\circ$ до 165° при незмінній витраті полімеру на одиницю довжини щілини, що дорівнює $7,5 \cdot 10^{-4}$ кг/мс, призводить до зниження ефективності полімеру у 1,2 рази при $V_0 = 12,2$ м/с та у 6 разів при $V_0 = 25$ м/с.

Із зіставлення результатів дослідів при інжекції полімерних розчинів різних концентрацій крізь підщілинну камеру з кутом входу, що змінюється (рис. 5):

$$\gamma = Q \cdot \frac{C_{ПЕО}}{\Omega \cdot V_0}, \quad (1)$$

де Q – швидкість інжекції,
 $C_{ПЕО}$ – концентрація полімерного розчину, що інjektується,
 Ω – змочена поверхня,

V_0 – швидкість основного потоку, впливає, що при заданій середній концентрації полімеру в пограничний шар ефективність зменшення опору знижується із зростанням концентрації полімерного розчину, що інjektується, і тим сильніше, чим вище кут входу.



$V_0: \bullet = 16,5$ м/с, $\circ = 25$ м/с;
 $\beta^\circ: 1, 2, 3 - 7,8^\circ, 4, 5, 6 - 165^\circ$
 $C_{ПЕО}: 1$ і $4 - 0,05\%$, 2 і $5 - 0,1\%$, 3 і $6 - 0,3\%$

Рисунок 5 – Залежність загальних втрат тиску в каналі від приведеної концентрації ПЕО

У роботі [14] була висунута гіпотеза про те, що в'язкопружні ефекти (розбухання струменя) поблизу щілини підсилюють захоплення розчину полімеру зовнішнім пограничним шаром і призводять до швидшого зниження концентрації полімеру на поверхні обтікаючої поверхні. Результати робіт [15,16] заставляють переглянути цю гіпотезу, оскільки візуалізація течії за щілиною [15] і вимір концентрації полімеру в пограничний шар [16] не показали посилення дифузії полімеру. Найприйнятнішим є пояснення, що ґрунтується на впливі ефективної в'язкості (якщо розуміти її в широкому сенсі), яке не протирічить результатам, що харак-

теризують залежність гідродинамічної активності полімеру від умов підведення полімерного розчину на поверхню обтікаючої поверхні. Адаптивна динамічна структура, що утворюється під дією гідродинамічного поля в полімерному розчині, викликають його загушення [1–4,13], а це, природно, повинно призвести до зменшення дифузії полімеру в пограничний шар.

Виявлені закономірності прояву пружних деформацій при підводі розчину полімеру в пожежний рукав дозволяють запропонувати спосіб оцінки опору течії рідини, що використовується у пожежогасінні з домішками полімеру. Опір течії рідини при підводі в приграничний шар полімерного розчину з урахуванням ефектів пружних деформацій, що виникають при цьому, може бути визначений за допомогою виразу

$$X = \int_0^{\ell_\lambda} \chi(x) \tau_{wo} dx + \int_{\ell_\lambda}^{\ell_p - \ell_\lambda} \chi(x) \tau_{wc} dx, \quad (2)$$

де χ - периметр перерізу пожежного рукава (трубопроводу),

τ_{wc} , τ_{wo} - дотичні напруження з подачею та без подачі полімеру в пограничний шар,

ℓ_p - довжина пожежного рукава (трубопроводу), $\ell_\lambda = \theta_{св} \cdot V_0$.

Отже, наведені дані свідчать, що у випадку зменшення гідродинамічного опору пожежних рукавів або стаціонарних трубопроводів пожежних систем за допомогою інжекції полімерних розчинів в приграничний шар в частині розробки оптимальних варіантів систем підведення необхідно враховувати можливість утворення надмолекулярних структур в розчинах полімерів під час їх інжектування. Зниження ефекту Томса при підведенні полімерного розчину в приграничний шар пожежного рукава є результатом поєднання деформаційної дії повздовжнього гідродинамічного поля, що реалізується в системі підведення, та молекулярно-концентраційних характеристик полімерного розчину.

Висновки

1. Робота демонструє шляхи підвищення ефективності систем введення полімерів в пожежні рукави і трубопроводи з метою зниження гідродинамічного опору течії вогнегасної рідини, а, отже, систем пожежогасіння водою і розчинами поверхнево-активних речовин.

2. Використання високоефективних систем введення полімерів в пожежні трубопроводи та рукави при течії вогнегасних агентів сприятиме покращенню різноманітних характеристик процесу гасіння пожеж, а це забезпечить підвищенню рівня охорони праці та безпеки технологічного та оперативного персоналу, особливо працівників служби цивільного захисту, під час ліквідації аварійних ситуацій на пожежонебезпечних, зокрема нафтогазових об'єктах.

1 Погребняк В. Г. Энергобережения і ефект Томса / В. Г. Погребняк, В. С. Волошин; за ред. Ю. Ф. Іванюти. – Київ : Освіта України, 2017. – 440 с.

2 Pogrebnyak V. G. Solutions of Polymers under the Conditions of Wall Turbulence. Mechanism of Drag Reduction / Pogrebnyak V. G. // Intern. J. of Fluid Mech. Research. – 2002. – Vol. 29, № 6. – С. 130–138.

3 Lunley J. L. The Toms phenomenon: anomalous effect in turbulent flow of dilute solutions of high molecular weight linear polymer / Lunley J. L. // Appl. Mech. Revs. – 1967. – Vol. 20, № 12. – P. 1139–1149.

4 Petterson G. K. Drag reduction polymer solutions, soap solutions and solid particle suspension in pipe flow / Petterson G. K., Zakin J. L., Rodrigues J. H. // Theor. and Eng. Chem. – 1969. – Vol. 61, No 1. – P. 22–30.

5 Hoyt J. W. Polymer drag reduction – a literature review / Hoyt J. W. // Drag Reduction.: Pap. 2-nd Int. Conf., Cambridge, 1974. – Cranfield, s.a. A 1.1 – A 1.19.

6 Повх И. Л. Связь между молекулярным строением растворов ПЭО и эффектом снижения гидродинамического сопротивления / Повх И. Л., Погребняк В. Г., Торьяник А. И. // Инж.-физ. журн. – 1979. – Т. 37, № 4. – С. 581–588.

7 Fabula A. G. The Phenomenon in the Turbulent Flow of Very Dilute Polymer Solutions / Fabula A. G. // Proceeding of the Fourth International Congress on Rheology / ed. Lee E.H.– New York, Interscience, 1969. – pt. 3. – P. 455–460.

8 Симоненко А. П. Применение гидродинамически-активных полимерных композиций в пожаротушении / Симоненко А. П., Ступин А. Б., Быковская Н. В. // Бюллетень пожежної безпеки (науково-технічні проблеми та рішення). – 2001. – № 2 (7) – С. 4 – 5.

9 Симоненко А. П. Гидродинамически-активные полимерные композиции в пожаротушении / Симоненко А. П., Асланов П. В., Ступин А. Б.– Донецк: ДонГУ, 2001. – 174 с.

10 Повх И. Л. Сопротивление при турбулентном течении растворов полимеров и мицеллообразующих ПАВ / Повх И. Л., Погребняк В. Г., Торьяник А. И. // Инж.-физ. журн. – 1979. – Т. 37, № 5. – С. 793–797.

11 Повх И. Л. Снижение турбулентного трения в водных растворах смесей полимеров и ПАВ / Повх И. Л., Сердюк А. И., Павелко М. М., Лебедев Н. М. // Инж.-физ. журн. – 1988. – Т. 54, № 5. – С. 759–764.

12 Pogrebnyak A. V. Degradation of Polymer Solutions in a Hydrodynamic Field with a Longitudinal Velocity Gradient / Pogrebnyak A.V., Perkun I. V, Pogrebnyak V. G. // Journal of Engineering Physics and Thermophysics.– 2017. – Vol. 90. – No 5. – pp. 1219–1224.

13 Pogrebnyak A. V. Structure formation in polyethyleneoxide solution streaming through jet-shaping head / Pogrebnyak A.V., Ivanyuta Yu.F. //

Scientific journal NRU ITMO Series "Processes and equipment". 2015. No 3. P. 6–13.

14 Wu J. Drag reduction by polymer diffusion at high Reynolds numbers / Wu J., Fruman D. H., Tulin M. P. // J. of Hydronautics. – 1978. – Vol. 12, Juli. – P. 134–136.

15 Фруман Г. Д. Аномальные эффекты, связанные с эжекцией полимера, уменьшающего сопротивление, в турбулентные пограничные слои чистой воды / Фруман Г. Д., Галивел П. // Снижение вязкого трения / под ред. Хью Г. Р. – М., 1984. – С. 342–359.

16 Вдовин А. В. Диффузия растворов в турбулентном пограничном слое / Вдовин А. В., Смольяков А. В. // Журн. прикл. механики и техн. физики. – 1978. – № 2. – С. 66–73.

Стаття надійшла до редакційної колегії

01.11.18

*Рекомендована до друку
професором **Паневником О.В.**
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)
професором **Чернюком В.В.**
(Національний університет
«Львівська Політехніка», м. Львів)*

Інформаційні технології

УДК 004.82:622.286

DOI: 10.31471/1993-9973-2018-3(68)-46-59

ЙМОВІРНІСНА ОЦІНКА РЕЗУЛЬТАТІВ ІНТЕРПРЕТАЦІЇ ДАНИХ ТА ПАРАМЕТРІВ ГЕОФІЗИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Л.М. Гобир, Р.Б. Вовк, Л.О. Потеряйло, В.І. Шекета

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу;
вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, 76019, e-mail: vasyshketa@gmail.com

Розроблено кейс-базовану методику набуття знань у ході імплементації діалогу «експерт - інтелектуальна система». Запропоновано стратегію темпорального представлення видобутих кейсів даних та знань про предметну область. Розроблено методику ініціалізації функції належності методом формальних оцінок кейсів, яка використовується для обробки результатів діалогу з групою фахівців з контенту. Застосовано розроблений формально-логічний апарат до оброблення кейсів реальних даних предметної області. Проаналізовано і узагальнено процес прогнозування вуглеводневих запасів інтелектуальною системою. Запропоновано практичну реалізацію архітектури бази кейсів інтелектуальної системи для прогнозування вуглеводневих покладів.

Ключові слова: кейси, контрольовані параметри, набуття знань, функція належності, формальні оцінки кейсів, предметна область, експертні оцінки, база кейсів, інтелектуальна система.

Разработана кейс-базирующаяся методика получения знаний при имплементации диалога «эксперт-интеллектуальная система». Предлагается стратегия темпорального представления добытых кейсов данных и знаний о предметной области. Разработана методика инициализации функции принадлежности по методу формальных оценок кейсов, использующаяся для обработки результатов диалога с группой специалистов по контенту. Применен разработанный формально-логический аппарат к обработке кейсов реальных данных предметной области. Проанализирован и обобщен процесс прогнозирования интеллектуальной системой углеводородных запасов. Предлагается результат практической реализации архитектуры базы кейсов интеллектуальной системы для прогнозирования углеводородных залежей.

Ключевые слова: кейсы, контролируемые параметры, приобретение знаний, функция принадлежности, формальные оценки кейсов, предметная область, экспертные оценки, база кейсов, интеллектуальная система.

The case-based method of acquiring knowledge during the implementation of the dialogue "expert-intellectual system" was developed. The strategy of temporal representation of the extracted case data and knowledge about the subject area is proposed. A method for initializing the membership function based on the method of formal case evaluations is developed, which is used to process the results of a dialogue with a group of content specialists. A formal logic has been developed to handle case data of real domain data. The process of prediction of hydrocarbon reserves by the intellectual system is analyzed and summarized. The practical implementation of the architecture of the case base of the intellectual system for prediction of hydrocarbon deposits is proposed.

Key words: cases, controlled parameters, acquisition of knowledges, membership function, formal evaluation of cases, subject area, expert evaluations, case base, intellectual system.

Вступ

Однією із основних цілей побудови інтелектуальних систем є забезпечення можливості ітеративних консультацій, що починаються з простих і легкодоступних даних. Як правило, на основі цих даних може бути виведено число можливих прогнозів, відтак для підтвердження

або спростування цих гіпотез потрібно подальше дослідження. Система використовує нафтогазову інформацію, що зберігається в базі даних, для того, щоб спрогнозувати форми, яких повинні набуті ці додаткові дослідження. Очевидно, що для подальшого дослідження виконують саме ті спостереження, які повинні підтвердити або спростувати певний прогноз. Крім

того, вказуються ті спостереження, які можуть перевести даний очікуваний, ймовірний прогноз на більш високий рівень в ранжованому списку всіх можливих прогнозів.

Мета роботи виділити в предметній області ключові поняття і об'єкти, описати взаємозв'язки між ними і визначити процедури обробки знань. Основна проблема в дискретності і низькій структурованості знань експерта і тих труднощах, які виникають при спробі експерта дати словесний опис тих знань, які він використав для прийняття того чи іншого рішення.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень і публікацій

В інженерії знань виділяють дві ключові фігури – експерт та інженер-когнітолог, який проводить бесіди з експертом [1, 2]. Відомо, що доступна експерту інформація про нафтогазові об'єкти і взаємозв'язки між ними в загальному випадку є суттєво невизначеною [3, 4, 5]. Проте експерт все ж здатний робити певні логічні висновки на основі цієї інформації. Л. Заде [6] запропонував оцінювати ступінь належності числам із інтервалу [0..1]. Фіксування конкретних значень при цьому має суб'єктивний характер. Важливим є як характер змін, так і тип шкали, в якій одержують інформацію від експерта. Під час проектування інформаційної системи адаптовано і модифіковано метод інтервальних оцінок, запропонований в роботі [7]. Згідно з теорією конструктивів [8] у свідомості експерта існують суб'єктивні утворення, що описують альтернативні події, протилежні моделі поведінки в певних ситуаціях. Наприклад, колектор нафти і газу – гірська порода, що здатна вміщувати нафту і газ і віддавати їх (пропускати крізь себе). Породо-покришка, на відміну від колектора, не вміщує нафти і газу. Інформація про відношення може бути зібрана в числовому або лінгвістичному вигляді з використанням наперед визначених лінгвістичних значень для означення *контрольованих параметрів*, таких як частота проявів і ступінь підтвердження. Таким чином, можуть бути одержані емпіричні знання, що спираються на міркування, які визначають знання [9, 10].

Висвітлення невирішених раніше частин загальної проблеми

Введення ключових слів викликає відповідні розділи із довідника спостережень. Інженер-когнітолог може зв'язувати з цими спостереженнями відповідні нечіткі значення. Після того, як зібрані всі спостереження, роблять логічний висновок типу “спостереження-спостереження”. Список спостережень містить всі необхідні пункти даних, що включають нечіткі значення, результати вимірювання і ви-

сновку, числові значення, дані спостережень. Після цього список спостережень перевіряється на суперечливість. Підтверджені і будь-які інші можливі прогнози в сукупності повинні пояснювати будь-яке спостереження чи результат лабораторного дослідження. Наявність непояснених даних вказує як правило, на те, що певну сукупність об'єктів необхідно дослідити додатково. *Таким чином*, знання про реальний світ характеризуються неповнотою, неточністю і неузгодженістю, що вимагає застосування теорії нечітких множин, яка уможливує означення нечітких нафтогазових об'єктів і закладає, відповідно, основу лінгвістичного підходу як ефективного наближення модельованої сутності нафтогазових об'єктів.

Формулювання цілей статті

Однією із основних властивостей якісної консультативної експертної системи є діалог, що оперує добре зрозумілими користувачу поняттями. Так, якщо з системою працює спеціаліст, використання складних термінів робить діалог точним і ефективним, коли діалог проводиться з непрофесіоналом, складні терміни тільки заплутують його. Ці дві групи користувачів представляють границі загальної ситуації створення діалогу для експертної системи.

Таким чином, *метою даної статті* є ймовірна оцінка та інтерпретація даних контрольних параметрів предметної області для спеціаліста-експерта, що дозволяє сформулювати прогноз найбільшої точності, яка залежить від здатності системи пояснити одержані нею результати. За запитом користувача повинна надаватися інформація, що додатково пояснює підтверджені і можливі прогнози. Ця інформація повинна відображатися у вигляді назв нафтогазових об'єктів, їх означень, відповідних їм вимірних нечітких значень *контрольованих параметрів*. Дуже часто користувач відповідає *невизначено* на питання системи, сподіваючись на краще розуміння сутності проблеми у ході діалогу. Дана проблема вирішується шляхом впорядкування діалогу за рівнями. Кожен рівень розрахований на певного користувача. На найвищому рівні використовують складні і точні терміни. Зі зниженням рівня мова діалогу все більше наближається до рівня ключових термінів.

Висвітлення основного матеріалу дослідження

Точність існує тільки як абстракція. Абстракція ж може бути означеною, як здатність людини розпізнавати і вибирати потрібні властивості явищ і об'єктів реального світу. Це створює можливість для побудови концептуальних моделей, що визначають абстрактні класи явищ і об'єктів. Проте, насправді, кожне

явище, кожний об'єкт реального світу є унікальним [11, 12].

Абстрактні моделі явищ і об'єктів реального світу, такі як математичні структури, рівності і висловлювання, є штучними конструкціями. Це ідеальні структури, ідеальні рівності, ідеальні висловлювання.

Для ефективної роботи з експертом інженер зі знань повинен виділити і дослідити всю множину особистісних конструктивів експерта і їх структуру.

Інженер зі знань разом з експертом складають список об'єктів, що відіграють роль гіпотез і спостережень. Наприклад, для аналізу спостереження "приплив нафти і газу" проводять:

- відбір керну (зразків порід);
- геофізичні дослідження свердловини (каротаж);

- випробовування свердловин.

Експерт вказує, які пари «спостереження-гіпотеза» і «гіпотеза-гіпотеза» асоціативно пов'язані. Наприклад:

- чуттєво-візуальні – запах нафти;
- форма кривих при каротажі свердловини і значення амплітуд ;
- одержання припливів нафти і газу.

В результаті одержують сітку об'єктів. На наступному кроці одержують інформацію про тип об'єкта (чи він одержаний в результаті спостереження, чи в результаті висновку), тип асоціативного зв'язку (пояснення, передбачення), напрям і числова оцінка асоціативного зв'язку. Із всіх гіпотез, що пояснюють дане спостереження, вибирають найбільш ймовірну. Наприклад, маючи спочатку дві основні гіпотези «нафтоносність» і «водоносність» результаті за результатами аналізу спостережень і інтерпретації одержаних даних робиться висновок про характер насичення колектора (здебільшого за каротажними кривими).

Далі виділяються окремі фрагменти інформації, і встановлюються зв'язки між кожним фрагментом і текстом, що його уточнює:

- склад колектора – порода (пісок, глина, алевроліт);
- форма каротажних кривих, зв'язок між ними ;
- наявність певного виду флюїду.

Також встановлюються зв'язки між парами фрагментів. Наприклад, невідповідність характеру каротажних кривих гіпотезі про насичення колектора певним флюїдом вказує на наявність винятків.

Для кожної з гіпотез, що пояснюють дане спостереження, вводять певну числову оцінку – середньостатичні дані по району дослідження.

Виділяється ряд фільтраційно-ємнісних властивостей колектора:

- пористість (діапазон значень 8-25 %);
- проникність (діапазон значень 10-1200 мД);

- водонасиченість (діапазон значень 5-100 %);

- нафтонасиченість (діапазон значень 0-95 %);

- газонасиченість (діапазон значень 0-95 %).

В множині всеможливих станів виділяють продуктивні і непродуктивні колектори. Серед продуктивних виділяють нафто- і газонасичені.

Між фрагментами прослідковують такі типи зв'язків: "склад породи – форма числові значення кривих", "товщина породи – форма кривої", "насиченість породи – форма кривої", "насиченість - опір".

На основі одержаної інформації інженер зі знань формує грубу моделі предметної області, означуючи предикати і їх можливі аргументи. Наприклад, предикат – порода, аргументи – пісковик, вапняк, алевроліт, глина; предикат – колектор, аргументи – пісковик, алевроліт, вапняк; предикат – покришка, аргументи – сіль, глина, вапняки.

Властивості предикатів і зв'язки між ними утворюватимуть структуру предметної області. Властивості предикатів і зв'язки між ними розглядають з точки зору взаємного розташування в розрізі земної кори колекторів і покришок. Взаєморозміщення типу "колектор - низу, покришка - зверху" є сприятливим для нафтогазонакопичення.

Далі з допомогою метазнань здійснюється перевірка відповідності між фактами і предикатами, індуктивний висновок фактів із правил, висновок правил із інших правил. В побудованій моделі при достатній кількості структурних компонентів можна виконувати передбачення невідомих фактів і знань шляхом перенесення їх з одних об'єктів на інші, з огляду на подібність між цими об'єктами.

Обов'язковим є виконання таких умов:

- 1) відповідність одержаних каротажних кривих теоретичним положенням;

- 2) відповідність лабораторних досліджень керну результатам випробовувань;

- 3) відповідність висновків про продуктивність ГДС результатам випробовування.

При проведенні досліджень доцільно використовувати аналогії між характером каротажних кривих в одних геологічних умовах із відповідними кривими в інших геологічних умовах.

У процесі побудови моделі для позначення об'єкту найнижчого рівня використовують індивідуальні імена (наприклад, пісковик, вапняк, алевроліт). Загальні імена використовують для позначення невизначеного об'єкту, або множини об'єктів (наприклад, порода, колектор). Для представлення предикатів використовують метаімена. Їм не відповідають ніякі множини об'єктів.

Імена визначають об'єм понять та ознаки, що характеризують їх зміст [13, 14]. При про-

гнозуванні нафтогазових колекторів пропонується застосовувати такі ознаки.

1. Дименесив (характеристика розміру, обчислювальної міри величини) – застосовується для опису понять «пористість», «проникність».

2. Квалітатив (якісні характеристики) – використовуються при описі складу колектора (теригенний, карбонатний) та характеру насичення.

3. Локатив (характеризує місцезнаходження) – використовується для опису взаєморозміщення (наприклад, “колектор-покришка”).

4. Темпоратив (опис часових характеристик) – при розкритті нафтонасиченого колектора і при промисловому відборі нафти відбувається її заміщення водою.

5. Фабрикатив (фізичний склад) – вуглеводні в колекторі можуть перебувати в двох фазових станах: рідина або газ.

6. Генеративний зв'язок Gen (коли один компонент позначає предмет, що належить до сукупності, позначається іншим компонентом) – компонент-зерно, компонент-пора, тріщина. Якщо порода є теригенною і має зернисту структуру, то наявний другий компонент - пора.

7. Дестинативний зв'язок Des (один компонент, який вказує на призначення іншого компонента) – в системі «природний резервуар нафти і газу» є два компоненти: порода-колектор і порода-флюїдоупор. Другий компонент призначений для створення екрану для першого компонента.

8. Директивний зв'язок Dir (один компонент позначає шлях, напрям іншого компоненту) – система природний резервуар зумовлює переміщення флюїдів в напрямі знизу угору.

9. Інструментальний зв'язок Ins (один компонент позначає знаряддя дії, що позначається іншим компонентом) в процесі переміщення флюїдів у колекторі відбувається їх диференціація і розміщення за густинами.

10. Каузальний зв'язок Sous (один компонент позначає причину виникнення іншого компонента через певний проміжок часу) – в процесі розробки родовища методом заводнення пластів закачування води в нагнітальну свердловину має наслідком витіснення нафти з пласту.

11. Комітативний зв'язок Com (один компонент позначає дію, що супроводжує інший компонент) – в процесі розробки нафтового покладу при падінні пластового тиску розчинений в нафті газ, розширюючись, спричиняє витіснення нафти.

12. Корелятивний зв'язок Cor (один компонент виражає можливість спостереження за іншим компонентом, або відповідності одного предмета іншому) – пара «пористість-проникність». Між пористістю і проникністю часто спостерігається прямий зв'язок – збіль-

шення пористості призводить до збільшення проникності.

13. Негативний зв'язок Neg (один компонент заперечує можливість появи іншого компонента) – якщо пластові води супроводжують нафтовий поклад, то вони, як правило, високо-мінералізовані. Наявність прісної води заперечує наявність покладу.

14. Лімітативний зв'язок Lim (один компонент позначає сферу застосування чи призначення іншого компонента) – характер насичення колекторів мінералізованими водами хлор-кальцієвого типу визначає застійний характер гідродинамічного режиму цих вод.

15. Медіативний зв'язок Med (один компонент має значення способу дії другого) – закачування води – витіснення нафти.

16. Посесивний зв'язок Pos (один компонент виражає приналежність іншому компоненту) – у нафті завжди є розчинений вуглеводневий газ.

17. Потенсивний зв'язок Pot (один компонент призводить до можливості виникнення іншого через деякий проміжок часу) – при певних термобаричних умовах (висока температура і тиск) рідинні вуглеводні перетворюються в газоподібні.

18. Результативний зв'язок Res (один компонент виражає наслідок дії іншого) – розширення пластового газу внаслідок зменшення пластового тиску.

19. Репродуктивний зв'язок Rep (один компонент є вихідним пунктом для відтворення чи перетворення іншого компонента) – при підйомі на поверхню газової суміші з великих глибин виділяються два компоненти – газ і конденсат.

20. Ситуативний зв'язок Sit (один компонент позначає ситуацію, що визначає стан або область дії другого) – зменшення пластового тиску нижче тиску насичення спричиняє виділення газу в окрему фазу.

21. Трансгресивний зв'язок Trg (один компонент позначає результат перетворення іншого) – сума водонасичення, газо- і нафтонасичення дорівнює 100%.

Одним із способів прискорення пошуку релевантних знань є їх зв'язаність [4]. Знання слід організовувати навколо найбільш важливих об'єктів предметної області. Всі знання, що характеризують деяку сутність, зв'язуються і подаються вигляді окремого об'єкту.

Якщо системі потрібна інформація про деяку сутність, то вона спочатку шукає об'єкт, що її описує, а потім вже всередині об'єкту шукає інформацію про дану сутність.

В об'єктах, в свою чергу, виділяють два типи зв'язків між елементами – зовнішні і внутрішні. Внутрішні зв'язки об'єднують елементи в єдиний об'єкт і утворюють його структуру. Зовнішні зв'язки відображають залежності, що існують між об'єктами в предметній області.

Зовнішні зв'язки поділяють на логічні і асоціативні. Логічні зв'язки виражають семантичні відношення між елементами знань. Асоціативні зв'язки забезпечують взаємозв'язки, що прискорюють пошук релевантних знань.

Кожен виділений об'єкт предметної області володіє певними характеристиками та властивостями. Наприклад, для об'єкту "родовище" типовими атрибутами є глибина залягання, вік, літологія тощо. Атрибути набувають конкретних значень. Так, глибина залягання може набувати значень 5096 м, літологія – пісковики кварцові тощо

В таблиці 1 наведено опис об'єкту "родовище" [15].

Таблиця 1 – Представлення фактів з допомогою типлетів O - A - 3

Об'єкт	Атрибут	Значення
Родовище	назва	Березівське
Родовище	глибина залягання	5096
Родовище	літологія	пісковики кварцові

Використання триплетів O-A-3 для опису реальних об'єктів не враховує власне характер і вид взаємозв'язків, які можуть мати причинно-наслідковий характер, чи бути відношеннями типу «частина-ціле» тощо. На форму зв'язків не встановлюється жодних обмежень.

Властивості конкретного об'єкта описують парами «атрибут-значення» A-3 (табл. 2).

Таблиця 2 – Представлення фактів з допомогою пар A - 3

Атрибут	Значення
назва	Березівське
глибина залягання	5096
літологія	пісковики кварцові

Відношення між окремими характеристиками об'єктів подається у вигляді таблиць, в яких кількість стовбців відповідає ступеню відношення, а один рядок дорівнює відповідному кортежу.

Дані про кожний об'єкт, що описується в таблиці (про кожне родовище), займають один цілий рядок. Структура всіх рядків збігається. Степінь відношення n вказує на те, що описуються однотипні об'єкти, які мають по n атрибутів. Якщо система зустрине в базі знань відношення A і B з степенями відповідно 5 і 7, то вона розуміє, що йдеться про різні типи об'єкти, один з яких має 5, а другий 7 атрибутів.

Таблиця 4 – Опис об'єкту "порода"

Порода	Характеристика X	Характеристика Y
Продуктивний колектор	опір_пласту >= 20	Пористість_відкрита > 6. 5
Колектор	опір_пласту < 20	Пористість_відкрита > 6. 5

В таблиці 3 зображено відношення, куди записані відомості про кілька родовищ, по яких працюватиме система.

Таблиця 3 – Фрагмент відношення степеня 4

Назва родовища	Глибина залягання	Вік	Літологія
Кременівське	1210	C2	пісковики поліміктові
Богатойське1	2232	C2	пісковики мезоміктові
Богатойське3	4297	C1t	вапняки і доломіти
...

Співвідношення родовищ – це одна із іменованих таблиць. Ім'я таблиці (в даному випадку «Родовище») визначаються смисловим відношенням. Степінь відношення дорівнює кількості стовпців у таблиці.

Як ефективні засоби збереження фактів використовуються правила зі змінними величинами. Змінні в правилах замінюють певну сукупність фактів. Розглянемо правила в формі обмежень:

обмеження

опір_пласту >= 20
і пористість_відкрита > 6. 5

висновок

порода - продуктивний колектор.

обмеження

опір_пласту < 20
і пористість_відкрита > 6. 5

висновок

порода - колектор.

Через використання змінних ці правила можна об'єднати в одне:

обмеження

порода має характеристику X
і порода має характеристику Y

висновок

порода - Z.

Для правил із змінними будують реляційні таблиці, в яких містяться фактичні значення змінних.

В таблиці 4 описується вся та інформація, що і в вихідних правилах. Назва таблиці відповідає назві абстрактного об'єкту, а заголовки стовбців – атрибутам об'єкту.

Використання фреймів дозволяє об'єднувати всі характеристики окремого об'єкту в одну групу і маніпулювати з нею, як з єдиним цілим.

Фрейму присвоюється ім'я, що збігається з назвою об'єкту, який він описує. Фрейм складається зі слотів. Вся наявна інформація про об'єкт структурується, і її окремі компоненти записуються в слоти.

В таблиці 5, як приклад, показано фрейм, з допомогою якого описується абстрактна категорія «родовище».

Таблиця 5 – Фрейм «родовище»

Назва родовища	?
Глибина залагання	?
Вік	?
Літологія	?
Дослідження	ДОСЛІДЖЕННЯ
Ознака продуктивного колектора	Продуктивний, якщо опір_пласту > 20

Фрейм містить інформацію, загальну для всіх родовищ. Символ «знак питання» означає, що вміст слоту ще невідомий системі.

Верхня частина фрейму призначена для зберігання фактичної інформації. Відповідні слоти можна було би без проблем записати у вигляді триплетів О - А - З чи n-арних відношень.

Вмістом слоту «дослідження» посилання на інший фрейм.

В нафтогазовій справі немає потреби розглядати мікроявища і мікрооб'єкти, щоб зіткнутися з проблемами неповноти, невизначеності і неузгодженості. Недостатня кількість інформації, її неточність і суперечливість є дуже важливим фактом.

Розглядаються чотири класи об'єктів:

- спостереження, ознаки, результати геофізичних досліджень і одержані дані (tp_i);

- гіпотези і сценарії (hyp_j);

- проміжні комбінації ($temp_k$);

- комбінації спостережень ($\otimes tp_i$).

Спостереження tp_i приймають значення mf_{OVi} із $[0,1] \cup \{v\}$. Значення mf_{OVi} вказує на інтенсивність прояву спостереження tp_i . Після цього будується бінарне нечітке відношення $W_{pOB} \subset \Pi \times \Sigma$, що визначається умовою $mf_{Wdeob}(DEq, tp_i) = mf_{OVi}$ для родовища DEq, де $DEq \in \Pi$ ($\Pi = \{DE1, \dots, DEr\}$) і $tp_i \in \Sigma$ ($\Sigma = \{tp_1, \dots, tp_m\}$).

Прогнози також набувають значень із $[0, 1] \cup \{v\}$. Нечіткі значення $0.00 < mf_{hyp_i} < 1.00$ – це можливі прогнози, тоді як значення $mf_{hyp_i} = 1.00$ і $mf_{hyp_j} = 0.00$ відповідають підтверженому і непідтверженому прогнозам від-

повідно. Ще не розглянутим прогнозам призначають значення $mf_{hyp_j} = v$. Формально будується співвідношення $W_{DEFC} \subset \Pi \times \Delta$, що визначається умовою $mf_{Wdefc}(DEq, hyp_j) = mf_{hyp_j}$ для родовища DEq, де $hyp_j \in \Delta$ ($\Delta = \{hyp_1, \dots, hyp_n\}$).

Обидва об'єкти, що розглядаються: проміжні комбінації і комбінації спостережень – набувають значень mf_{fck} і mf_{OCI} відповідно із $[0, 1] \cup \{v\}$, де v означає, що дійсне значення ще не визначено. Відношення $R_{DEOVC} \subset \Pi \times K$ задається умовою $mf_{deobc}(DEq, \otimes tp_i) = mf_{OVi}$ для родовища DEq, де виконується $OCI \in K$ ($K = \{\otimes tp_1, \dots, \otimes tp_l\}$), і W_{DEOVC} формально описує комбінації спостережень по даному родовищу.

Нечіткі логічні зв'язки визначаються наступним чином:

$Goal_1 \wedge Goal_2 = \min\{Goal_1, Goal_2\}$, якщо $Goal_1 \in [0, 1]$ і $Goal_2 \in [0, 1]$;

$Goal_1 \wedge Goal_2 = v$, якщо $Goal_1 = v$ і/або $Goal_2 = v$;

$Goal_1 \vee Goal_2 = \max\{Goal_1, Goal_2\}$, якщо $Goal_1 \in [0, 1]$ і $Goal_2 \in [0, 1]$;

$Goal_1 \vee Goal_2 = Goal_1$, якщо $Goal_1 \in [0, 1]$ і $Goal_2 = v$;

$Goal_1 \vee Goal_2 = Goal_2$, якщо $Goal_1 = v$ і $Goal_2 \in [0, 1]$;

$Goal_1 \vee Goal_2 = v$, якщо $Goal_1 = v$ і $Goal_2 = v$;

$Goal_1 = 1 - Goal_1$, якщо $Goal_1 \in [0, 1]$;

$Goal_1 = v$, якщо $Goal_1 = v$.

Слід зазначити, що введення величини v для відсутніх операндів, яка обов'язково повинна бути включена в означення «зв'язок і заперечення» із практичних міркувань, призводить до порушення деяких законів (наприклад, законів де Моргана). Ці закони справедливі для класичних нечітких зв'язок

$Goal_1 \wedge Goal_2 = \min\{Goal_1, Goal_2\}$,

$Goal_1 \vee Goal_2 = \max\{Goal_1, Goal_2\}$

відносно заперечення $Goal_1 = 1 - Goal_1$, але тепер вони втрачають силу.

Між нафтогазовими об'єктами розглядаються такі відношення:

- «спостереження-прогноз» ($tp_i hyp_j$);

- «комбінація спостережень – прогнозів» ($\otimes tp_i hyp_j$);

- «спостереження – спостереження» ($tp_i tp_j$);

- «прогноз-прогноз» ($hyp_i hyp_j$).

Ці відношення характеризуються двома параметрами:

- частота прояву (f);

- ступінь підтвердження (cd).

Відношення між нафтогазовими об'єктами задаються у вигляді правил відношення з відповідними їм парами відношень. Загальне формулювання такого правила має вигляд:

Таблиця 6 – Лінгвістичні нечіткі значення

Частота прояву			Ступінь підтвердження		
Значення λ_f	Інтервал	Характерне значення mf_f	Значення λ_{cd}	Інтервал	Характерне значення mf_{cd}
завжди	[1.00, 1.00]	1.00	завжди	[1.00, 1.00]	1.00
майже завжди	[0.98, 0.99]	0.99	майже завжди	[0.98, 0.99]	0.99
дуже часто	[0.83, 0.97]	0.90	дуже сильно	[0.83, 0.97]	0.90
часто	[0.68, 0.82]	0.75	сильно	[0.68, 0.82]	0.75
середнє	[0.33, 0.67]	0.50	середнє	[0.33, 0.67]	0.50
зрідка	[0.18, 0.32]	0.25	слабко	[0.18, 0.32]	0.25
дуже рідко	[0.03, 0.17]	0.10	дуже слабо	[0.03, 0.17]	0.10
майже ніколи	[0.01, 0.02]	0.01	майже ніколи	[0.01, 0.02]	0.01
ніколи	[0.00, 0.00]	0.00	ніколи	[0.00, 0.00]	0.00
невідомо		v	невідомо		v

Примітки: А – пористість відкрита, В – абсолютна проникність, С – опір пласту, D – питома продуктивність, Е – коефіцієнт водонасичення.

ЯКЩО (антецедент) **ТО** (консеквент) **ПРИ** (ОБМЕЖЕННЯ)

Пари відношення (f, cd) містять або числові значення mf_f і mf_{cd} , або лінгвістично нечіткі значення λ_f і λ_{cd} , або і t_i , і інші. Важливість характерних значень полягає в тому, що вони роблять нечіткий висновок легкоздійснюваним. Нижче наведені деякі приклади правил відношень.

Приклад 1

ЯКЩО (пористість_відкрита ≥ 8)
ТО (порода – колектор)

ОБМЕЖЕННЯ (0.75 = часто, 0.25 = слабо)

Приклад 2

ЯКЩО (абсолютна_проникність ≥ 0.7)
ТО (порода – продуктивний_колектор)

ОБМЕЖЕННЯ (0.25 = рідко, 1.00 = завжди)

Приклад 3

ЯКЩО (абсолютно_вільний_дебіт ≥ 20 \wedge питома_продуктивність ≥ 0.006 \wedge опір_пласту ≥ 10 \wedge коефіцієнт_водонасичення ≤ 42 \wedge параметр_насиченості ≥ 5.5)

ТО (порода – продуктивний_колектор)

ОБМЕЖЕННЯ (v, 0.90 = дуже сильно)

Значення mf_f і mf_{cd} інтерпретуються як значення нечітких відношень між антецедентами і консеквентами. Так,

hyp_j (відношення прояву)

$$W_{ОВFC}^f \subset \Sigma \times \Delta$$

$tp_i hyp_j$ (відношення підтвердження)

$$W_{ОВFC}^{cd} \subset \Sigma \times \Delta$$

$\otimes tp_i hyp_j$ (відношення прояву)

$$W_{ОВFC}^f \subset K \times \Delta$$

$\otimes tp_i hyp_j$ (відношення підтвердження)

$$W_{ОВFC}^{cd} \subset K \times \Delta$$

$tp_i tp_j$ (відношення прояву)

$$W_{ОВОВ}^f \subset \Sigma \times \Sigma$$

$tp_i tp_j$ (відношення підтвердження)

$$R_{ОВОВ}^{cd} \subset \Sigma \times \Sigma$$

$hyp_i hyp_j$ (відношення прояву)

$$R_{FCFC}^f \subset \Delta \times \Delta$$

$hyp_i hyp_j$ (відношення підтвердження)

$$R_{FCFC}^{cd} \subset \Delta \times \Delta$$

Система набуття знань здатна одержувати інформацію про нафтогазові об'єкти і відношення між ними. Відношення зберігаються у вигляді числових значень із проміжку [0, 1]. Інформація може бути одержана одним із двох способів:

- з допомогою числових або лінгвістичних оцінок від спеціалістів-експертів;

- шляхом статистичного оцінювання бази даних, що містить інформацію про нафтогазові об'єкти з підтвердженими результатами прогнозів.

Важливою властивістю таких відношення є те, що вони можуть бути інтерпретовані статистично. Частота прояву f і ступінь підтвердження cd становить:

$$mf_f = G(tp_i \cap hyp_j) / G(hyp_j) = G(tp_i / hyp_j) \quad (1)$$

$$mf_{cd} = G(tp_i \cap hyp_j) / G(tp_i) = G(hyp_j / tp_i) \quad (2)$$

де $G(tp_i \cap hyp_j)$ - абсолютна частота прояву tp_i і hyp_j ;

$G(hyp_j)$ - абсолютна частота прояву hyp_j ;

$G(tp_i)$ - абсолютна частота прояву tp_i ;

$G(tp_i / hyp_j)$ - умовна частота tp_i за умови hyp_j ;

$G(hyp_j / tp_i)$ - умовна частота hyp_j за умови tp_i .

З допомогою означень (1) і (2) розширене статистичне оцінювання відомих відношень між нафтогазовими об'єктами, або ще не ви-

Таблиця 7 – Зведена таблиця числового і лінгвістичного оцінювань родовищ

Родовище	A	B	C	D	E
Атазівське	7.0	досить низьке	досить високе	невідомо	[40-43]
Березівське	близько 8.0	[0.7-0.9]	високе	низьке	41
Буріватівське	[6.9- 8.1]	0.8	[9-10]	середнє	близько 42
Західносолохівське	низьке	досить високе	дуже високий	[0.005- 0.013]	[41-44]
Котелевське	близько 7.6	близько 1	низьке	дуже високе	досить високе
Матвійвське	середня	[0.7-0.8]	9.5	високе	низьке
Новомиколаївське	[7.9- 8.7]	Невідомо	близько 9	0.0075	середнє

значених відношень може бути здійснено використанням даних про вже розвідані і вивчені родовища.

В таблиці 7 наявні декілька типів значень атрибута: точні значення, інтервальні значення, нечіткі значення (наприклад, “високе”, “близько 9”, “середнє”) і невизначені значення. Неточні значення атрибута відповідають або частковому (неповному, або нечіткому) знанню, або грубою оцінкою.

В таблиці 8 область значень атрибута ТИП дискретна: $D_{\text{тип}} = \{a, b, c, d\}$, де кожне число відповідає певному типу характеристик. Оскільки тут наявні області двох типів (неперервні і дискретні), то можливі два способи подання функцій розподілу можливостей.

Таблиця 8 – Відношення з кількома атрибутами

Характеристика1	Характеристика2	Тип
пористість	проникність	розмір
колектор	покришка	місцезнаходження
рідина	газ	фізичний склад
закачування води	витіснення нафти	спосіб дії

Припустивши, що ступені приналежності нам відомі, наприклад у вигляді $mf_{\text{OB}}(v_i) = \xi_i$ ($i=1, 2, \dots, m$), то попарні порівняння можна представити матрицею відношень $C=(c_{ij})$, $c_{ij}=\xi_i/\xi_j$.

Оскільки відношення порівняння в реальному світі неточні через свою емпіричність, то потрібно обчислювати окремі оцінки для ξ . В процесі розв’язання задачі формується матриця порівнянь розглядуваної множини елементів. Елементи матриці показують, наскільки один елемент кращий від іншого. При формуванні оцінок попарних порівнянь від експерта вимагається вираження досвіду у вигляді:

- встановити, який із двох даних елементів є більш важливим;

- оцінити сприйняття інтенсивності розрізнення у вигляді рангу важливості за відповідною шкалою.

Розглядаючи поняття “клас F”, яке описується функцією належності на множині об’єктів $C=\{c^0, \dots, c^{m-1}\}$. В C є тільки два об’єкти c^k та c^l , з яких c^k - ідеальний представник тих об’єктів, які належать C, а c^l - ідеальний представник тих об’єктів, що не належать цьому поняттю. Завдання експерта полягає в ранжуванні об’єктів відповідно до їх належності (чи неналежності) описаному поняттю. Результиуюча матриця попарних порівнянь задає порядок пар об’єктів за ступенями відмінностей в парах.

На другому етапі визначається та максимальна кількість класів, яка може бути описана даним набором параметрів. Для кожного елемента v значення функції належності класу F_1 доповнює до одиниці значення функції належності класу F_2 . Таким чином, система класів повинна складатися із класів, що описують протилежні події. Сума значень функції належності довільного елемента v до системи таких класів буде дорівнювати одиниці. У випадку, коли число класів і їх склад чітко невизначений, то вводиться додатковий віртуальний клас, що включає всі невиявлені класи. Завдання експертів полягає в процентній оцінці ступеня прояву кожного з класів у конкретному стані v .

Вибірку об’єктів доцільно брати такою, щоб рівномірно представити ступені належності від 0 до 1 відносно нечіткої множини, що розглядається. При цьому повинні бути присутні принаймні два об’єкти, ступені належності яких рівні відповідно 0 і 1. В результаті опитування експертів одержується процентна оцінка ступенів належності.

Нехай інтервал $[y_{ml}, y'_{ml}]$ відображає думку l -го експерта ($l=1, \dots, n_1$) про значення m -ї ($m=1, \dots, n_2$) ознаки оцінюваного поняття ОВ. Повний опис цього поняття l -им експертом подаватиметься у вигляді

$$\Omega_l = [y_{1l}, y'_{1l}] \times \dots \times [y_{n_2l}, y'_{n_2l}] \quad (3)$$

Наведений нижче алгоритм, що дозволяє обчислювати коефіцієнти компетентності експертів, а також приводити вихідну “розміту” функцію, що є середнім значенням експертних оцінок, до характеристичної функції нерозмитої чіткої множини:

1. Для кожної ознаки m розглядають всі запропоновані експертами інтервали, знаходять їх об’єднання, які складається з інтервалів, що не перетинаються:

$$[y_{mk}, y'_{mk}], (m=1, \dots, n1 ; k=1, \dots, n2) . \quad (4)$$

2. На основі одержаних множин будемо результиуючу множину $Goal_k$:

$$Goal_k = [y_{1k}, y'_{1k}] \times \dots \times [y_{nk}, y'_{nk}], k=1, \dots, n2 \quad (5)$$

3. Обчислюємо для $x \in Goal_k$

$$\xi_l(y) = \begin{cases} 1, Z_k \cap \Omega_l \neq \emptyset \\ 0, Z_k \cap \Omega_l = \emptyset \end{cases} . \quad (6)$$

4. Приймаємо номер ітерації $in=1$

5. Вводимо коефіцієнти компетентності для експертів :

$$\{CC_l^{in}\}_{l=1}^{n1} = \{1/n1\}_{l=1}^{n1} . \quad (7)$$

6. Обчислюємо наближення функції належності при нормованих

$$CC_l : \sum CC_l^{ni} = 1, f^{in}(y) = \sum_{l=1}^{n1} \phi_l(y) * CC_l^{in}, \quad (8)$$

$$y \in Z_k .$$

7. Обчислюємо функціонал неузгодженості думки l-го експерта з думкою групи експертів на in – ітерації :

$$FD_l^{in} = \sum_{y \in Z_k} [f^{in}(y) - \phi_l(y)]^2, l=1, \dots, n1 . \quad (9)$$

8. Обчислюємо

$$\Phi = \sum_{l=1}^{n1} 1 / FD_l^{in} . \quad (10)$$

9. Збільшуємо крок ітерації на одиницю.

10. Обчислюємо

$$CC_l^{in} = \Phi / FD_l^{in-1} . \quad (11)$$

11. Якщо тепер величина $\max |CC_l^{in-1} - CC_l^{in}|$ близька до нуля, то ітераційний процес припиняється, і за наближення функції належності приймається $f(y)=mf_s(y)$, в протилежному випадку виконується перехід до пункту 6.

Основним елементом, з яким оперує система, є функція двох змінних, яка задана на регулярній сітці (полі). У вигляді полів подаються геолого-геофізичні ознаки досліджуваної структури і сам геолого-геофізичний прогноз.

Формовані системою геолого-геофізичні ознаки описують як локальні особливості середовища в околах вузлів, так і крупніші структурні неоднорідності. Геолого-геофізичні ознаки вибираються і кодуються спеціалістами так, щоб поле шуканого прогнозу могло бути з достатньою точністю апроксимовано функцією полів цих ознак. Основні засоби системи призначені для того, щоб допомогти спеціалісту знайти і проаналізувати дану прогнозуючу функцію і одержане поле прогнозу.

Для знаходження прогнозуючої функції використовується вибірка пунктів регіону, для якого даються оцінки прогнозу [16, 17]. У вибірці входять випадково вибрані точки, і точки, по яких існує додаткова інформація стосовно прогнозу. Точки вибірки повинні, по можливості, рівномірно заповнювати регіон і мати рівну

представленість для різних значень прогнозованої величини.

Оцінки прогнозу в точках вибірки роблять експерти. Спеціалісти, що приймають участь в експертизі, дають оцінки незалежно один від одного. При оцінюванні враховуються зареєстровані події або розвідані геологічні об'єкти, відомості про прогнозоване явище і знання про особливості геологічної будови і тенденціях розвитку регіону, що досліджується.

Як оцінки можуть використовуватися зареєстровані значення прогнозу. Проте в ряді випадків відмова від експертних оцінок і формальна заміна їх даними про зареєстровані спостереження збіднюють вхідну інформацію і можуть суттєво погіршити результати прогнозування.

Прогнозуюча функція [12] $FC(x, g)$, де x – вектор ознак; g – вектор оцінюваних параметрів, шукається в деякому наперед вибраному класі функцій, виходячи із умов найкращої апроксимації оцінок прогнозу в точках вибірки.

Важливим питанням є оцінювання точності апроксимації залежності прогнозу від геолого-геофізичних ознак. Відомі методи оцінювання точності апроксимації вимагають введення ряду статистичних тверджень, що явно не впливають із задачі, яка розв'язується. Тому як формальний показник точності рішення використовується величина середньої помилки апроксимації оцінок прогнозу.

Величина середньої похибки апроксимації не може служити єдиним критерієм правильності прогнозу. При хорошому прогнозі в середньому можуть існувати окремі зони, в яких прогноз сильно відрізняється від представлень експерта. В результаті аналізу одержаних розбіжностей спеціаліст повинен дати геолого-геофізичну інтерпретацію одержаного прогнозу і прогнозуючої функції, а також прийняти рішення про необхідність корекції моделі прогнозованого явища. При цьому може бути змінений вид прогнозуючої функції, або внесені зміни в склад вихідних даних: введені або знайдені засобами системи додаткові поля ознак, змінене кодування ознак, додані додаткові точки вибірки тощо. На кожному кроці ітерації спеціаліст формує модель прогнозованого явища і готує вхідні дані. Далі знаходиться прогнозуюча функція. Функція інтерпретується як гіпотеза про шукану закономірність, що узгоджується з наявними знаннями і даними. Результати аналізуються, і спеціаліст приймає рішення про необхідність виконання наступної ітерації.

В системі використовуються такі типи даних [18, 19, 20-24]:

1. Каталоги зареєстрованих геологічних об'єктів (розвідані родовища).

2. Лінеаментні і кільцеві структури, вихідні і одержані засобами системи поля геолого-геофізичних ознак.

Знання експертів складаються із знань про регіональну модель прогнозованого явища і знань про величину прогнозу на вибірці пунктів регіону.

Знання про характер залежності між прогнозованою величиною і геолого-геофізичними ознаками мають якісний характер. Із загальних теоретичних положень, або користуючись якісними моделями і емпіричними даними, спеціаліст може визначити характер зміни прогнозованої величини в залежності від змін окремо кожної із ознак за умови незмінності решти. Ці знання використовуються для вибору геолого-геофізичних ознак, для розроблення способів їх кодування, методики роботи з картами, обґрунтування рекомендацій щодо обчислення вторинних ознак засобами системи, а також для знаходження і аналізу прогнозуючої функції.

В системі функція прогнозування шукається у вигляді :

$$\text{Case}(x, g) = \sum_{i=1}^I \psi_i(x_i, g), \quad (12)$$

де $\psi_i(x_i, g)$ – кусково-лінійна функція від ознаки x_i , в якій вузли наперед задані, а вектор параметрів g визначає значення функції в вузлах. Вибраний клас функцій дозволяє при відносно малій розмірності вектора параметрів врахувати наявні в спеціалістів уявлення про неперервність залежності прогнозу від геолого-геофізичних ознак і про характер нелінійності шуканої закономірності.

Крім цього, цей клас функцій зручний при інтерпретації результатів прогнозу: кожен із функцій $\psi_i(x_i)$ можна інтерпретувати як нелінійний внесок ознаки x_i в прогноз, а поле прогнозування – як суму полів нелінійно перетворених ознак.

Частина знань про характер зв'язку між прогнозом і ознаками представлена в системі у вигляді фреймів і використовується для підтримки пояснення отриманих результатів [21].

Знання про значення прогнозу на вибірці пунктів регіону формалізовані і представлені у вигляді інтервальних експертних оцінок.

Вид інтервальної експертної оцінки EE підбирався таким чином, щоб методика оцінювання була простою і зручною для експерта і водночас забезпечувала одержання достатньо повної інформації про значення геофізичного прогнозу :

$$\text{Case}_1 = (tp^{(1)}, tp^{(2)}, w^{(1)}, w^{(2)}), \quad (13)$$

де $p^{(1)}, p^{(2)}$ – границі інтервалу для значення прогнозованої величини. В задачах апроксимації функціональних залежностей інтервал $[p^{(1)}, p^{(2)}]$ вибирається так, щоб всередині інтервалу всі значення прогнозованої величини були би, на думку експерта, найбільш імовірними і рівноможливими. В задачах розпізнавання прогнозуюча функція повинна набувати різних значень за наявності і відсутності корисних копалин. Із цих міркувань вибираються інтер-

вали $[p^{(1)}, p^{(2)}]$ для комірок, де зареєстровані родовища корисних копалин, і для комірок, де, на думку експертів, родовищ бути не може. $w^{(1)}, w^{(2)}$ – вагові коефіцієнти, за допомогою яких експерт вказує міру своєї впевненості в можливості того, що значення прогнозованої величини може бути меншим або більшим відповідної границі інтервалу $p^{(1)}$ або $p^{(2)}$.

Головна математична задача, що вирішується при побудові прогнозу, є задачею апроксимації функції багатьох змінних в деякому класі функцій [118]

$$\{\text{Case}(x, g)/g \in G\}, \quad (14)$$

де G – область допустимих значень вектора параметрів g . Розв'язок полягає в знаходженні оцінки вектора параметрів g за вибіркою спостережень $\{tp_{j,n}, x_n\}$, де $tp_{j,n}$ – інтервальна оцінка значення прогнозованої величини, визначена j -м експертом в n -й точці вибірки; x_n – вектор геолого-геофізичних ознак в n -й точці.

Оцінка вектора параметрів g має вигляд [22]

$$\bar{g} = \arg \min_{g \in G} \sum_n \sum_j pf(FC(x_n, g), tp_{j,n}), \quad (15)$$

де $pf(FC, S)$ – штрафна функція, що визначає величину штрафу за неточність апроксимації експертної оцінки tp значенням прогнозуючої функції

$$pf(FC, tp) = (w^{(1)}(|FC - p^{(1)}| + p^{(1)} - FC)/2 + w^{(2)}(|FC - p^{(2)}| - p^{(2)} + FC)/2)^q, \quad (16)$$

$$w^{(1)} > 0, w^{(2)} > 0, p^{(1)} \leq p^{(2)}, q \geq 1$$

Якщо прогнозуюча функція $FC(x, a)$ є лінійною за параметрами, то мінімізуючий функціонал є опуклим. Якщо при цьому область G допустимих значень вектора g також опукла, то при оцінюванні можна скористатися ітераційними алгоритмами градієнтного типу.

Очевидно, що в частковому випадку, коли використовуються експертні оцінки, в яких завжди $p^{(1)} = p^{(2)}, w^{(1)} = w^{(2)}$ при $q=1$, алгоритм оцінювання збігатиметься з методом найменших модулів, а при $q=2$ – з методом найменших квадратів.

В експертних оцінках неминуче зустрічаються протиріччя. Можлива ситуація, коли оцінки великого числа менш компетентних експертів можуть значно вплинути на оцінки найбільш кваліфікованих експертів. Формальна процедура вибору найбільш компетентних експертів базується на незалежності встановлення експертних оцінок і реалізує просту ідею: представлення і експертні оцінки компетентних експертів краще відображають шукані закономірності і тому близькі між собою.

В системі при знаходженні прогнозуючої функції одночасно виконується вибір найбільш суттєвих ознак. Це здійснюється з допомогою покрокової процедури. Вибирається ознака, що дає найкращу апроксимацію спостережень. На наступному кроці до неї добирається друга ознака, яка дає найменшу похибку апроксима-

ції в парі з першою ознакою і т. д.. Починаючи з деякого кроку похибка апроксимації на навчальній вибірці починає спадати незначно, а похибка на контрольній вибірці починає зростати, що вказує на недоцільність подальшого нарощування ознак.

Результатами рішення є побудований прогноз і знайдена залежність прогнозованої величини від геолого-геофізичних ознак. Мета аналізу полягає в тому, щоб обґрунтувати прогноз і прийняти рішення про спосіб його можливої корекції. Для вибраного класу функцій прогноз природним чином розпадається на адитивні компоненти. Це дозволяє пояснювати значення прогнозу в аналізованих точках, використовуючи значення $\psi_i(x_i, a)$ – внесків ознак x_i в прогноз $FC(x, a)$.

Формалізувати всі міркування спеціаліста про характер шуканої залежності наперед не вдається. Спеціаліст намагається інтерпретувати знайдену залежність в термінах якісних представлень. При одержанні неінтерпретованих функцій $\psi_i(x_i)$ спеціаліст може скоригувати залежність: вибрати інші вузли в функції $\psi_i(x_i, g)$, змінити кодування ознаки x_i , або відмовитися від цієї ознаки взагалі. Інтерпретація підтримується візуалізацією функцій $\psi_i(x_i, g)$ і процедурою пояснення прогнозу в точках вибірки. Процедура пояснення дає текстову інтерпретацію впливу на прогноз в аналізованій точці кожної з ознак. Зіставлення апріорних знань про характер функцій $\psi_i(x_i, g)$ зі знайденою залежністю може виявитися підказкою для нової інтерпретації залежності, або може бути прийнята за основу для коригування моделі.

Метою процедури обґрунтування є підтвердження прогнозу в деякій точці або вказання причини його неточності. При обґрунтуванні знаходиться група точок, що подібна до аналізованої за певними ознаками. Для деяких із виявлених точок може бути наявна додаткова інформація про геофізичний прогноз, наприклад зареєстровані значення прогнозу, або експертні оцінки прогнозованої величини. Ця інформація може підтверджувати прогноз в точці, що аналізується, або заперечувати його. Спеціаліст-експерт може з цим погодитися, або ні. В випадку незгоди перед ним виникає конкретна задача: пояснити, чим аналізована точка відрізняється від точок, виділених процедурою. Це може настановити спеціаліста на висновок про необхідність введення додаткових ознак, про необхідність зміни кодування ознак, про додавання точок у вибірку.

Результати спостережень можуть бути введені трьома способами:

- шляхом введення спостережень tp_i з допомогою природної мови;
- шляхом введення з допомогою природної мови ключевих слів, які приводять в дію цілі групи спостережень tp_i ;

- шляхом оцінювання бази даних, що містить інформацію про об'єкт, і перетворення інформації з допомогою нечіткого інтерпретатора.

На наступному кроці оцінюються проміжні комбінації спостережень. Після перевірки на відповідність обчислюються нечіткі значення для всіх комбінацій спостережень. Одержані в результаті списки тепер повні і не містять жодних протиріч. Нечіткі значення $=1.00$, тобто підтвержені прогнози FC_j для родовища DE_q визначаються з допомогою такого співвідношення:

$mf_{hyp_j} = 1.00$, якщо $mf_{w_{DEFC}}^1(DE_q, hyp_i) = 1.00$
або

$$mf_{w_{DEFC}}^4(DE_q, hyp_j) = 1.00. \quad (17)$$

Нечіткі значення $mf_{hyp_j} = 0.00$, тобто виключені прогнози hyp_i для родовища DE_q визначаються з допомогою : $mf_{hyp_j} = 0.00$, якщо

$$(mf_{w_{DEFC}}^2(DE_q, hyp_j) = 1.00 \text{ або}$$

$$mf_{w_{DEFC}}^3(DE_q, hyp_j) = 1.00$$

$$\text{або } mf_{w_{DEFC}}^5(DE_q, hyp_j) = 1.00$$

$$\text{або } mf_{w_{DEFC}}^6(DE_q, hyp_j) = 1.00).$$

Відношення типу “колектор-продуктивний колектор” допускають логічний висновок наступних прогнозів (такі, що підтверджуються або такі, що виключаються):

$$\mu_{hyp_i} = \begin{cases} 1.00, \text{ якщо } mf_{w_{DEFC}}^{10}(DE_q, hyp_i) = 1.00 \\ 0.00, \text{ якщо } mf_{w_{DEFC}}^{11}(DE_q, hyp_i) = 1.00 \\ 0.00, \text{ якщо } mf_{w_{DEFC}}^{12}(DE_q, hyp_i) = 1.00. \end{cases} \quad (18)$$

Можливим прогнозам відповідають нечіткі значення mf_{hyp_j} , такі, що

$$\begin{aligned} \epsilon &\leq mf_{hyp_j} \leq 0.99, \quad mf_{hyp_j} = \\ &= \max[mf_{w_{DEFC}}^1(DE_q, hyp_i); mf_{w_{DEFC}}^4(DE_q, hyp_i); \\ &\quad mf_{w_{DEFC}}^{10}(DE_q, hyp_i)], \end{aligned}$$

якщо

$$(\epsilon \leq mf_{w_{DEFC}}^1(DE_q, hyp_i) \leq 0.99 \quad (19)$$

$$\text{або } \epsilon \leq mf_{w_{DEFC}}^4(DE_q, hyp_i) \leq 0.99$$

$$\text{або } \epsilon \leq mf_{w_{DEFC}}^{10}(DE_q, hyp_i) \leq 0.99).$$

Оскільки значення μ_{FC_j} не залежать від кількості правил, які можуть бути використані для підтримки hyp_j . Це може бути введена евристична функція, що враховує число критеріїв, присутніх, або частково присутніх, які передбачають, але не підтверджують істинність прогнозу hyp_i . Таким чином, ця функція обчислює відповідне число точок PNR_{hyp_j} . Ці значення корисні тоді, коли треба робити вибір між різними можливими прогнозами, хоча кінцевою метою повинно бути одержання підтвер-

дженого прогнозу. Число точок PNR_{FCj} обчислюється таким чином:

$$PNR_{hyp_j} = 100 \sum_{i=1}^{k^*} \{ \alpha \min[mf_{WDEOB}(DE_q, tp_i); mf_{W_{OBF}^f}(tp_i, hyp_i)] + \beta \min[mf_{WDEOB}(DE_q, tp_i); mf_{W_{OBF}^{cd}}(tp_i, hyp_i)] \}, \quad (20)$$

де k^* - число спостережень по родовищу DE_q , які виникають при означенні hyp_j , а $\alpha + \beta = 1$.

00. Ми приймаємо $\alpha = 0.09$ і $\beta = 0.91$, тобто степінь підтвердження береться в десять разів більш значущою, ніж частота прояву за відношенням до значення PNR_{hyp_j} . Суму перемножуємо на 100 для того, щоб досягти одержання легких для читання і запам'ятовування значень числа точок.

Представлення знань в системі базується на таких пунктах:

Cases (Розділи)

Parameters (Параметри)

Для більшої читабельності інформації можна включати також коментарі.

Всі компоненти бази знань створюються з допомогою спеціальної мови формальних описів, в якій діють єдині правила синтаксису. Наступні метасимволи мови мають спеціальне призначення:

$::=$ інтерпретується як 'складається з' або 'оголошений як';

{ } фігурні дужки вказують на те, що послідовність в дужках може бути повторена нуль або більше разів;

[] квадратні дужки вказують на те, що послідовність в них використовується як опція;

< > імена в кутових дужках є синтаксичними елементами. Всі синтаксичні елементи будуть визначені, тобто вони з'являться зліва від символу ' ::= ' в граматичному правилі;

| вертикальна лінія читається, як 'або' і використовується для розділення альтернатив.

Верхній рівень представлення знань складається з розділів. Перший розділ в будь-якій базі знань повинен мати ім'я Start (Початок). Розділ складається з імені, текстового опису і кількох параграфів. Система опрацює параграфи розділу по одному зверху до низу. Якщо параграф містить логічний вираз, то він обчислюється першочергово. Якщо цей вираз істинний, або параграф не містить логічних виразів взагалі, то всі дії виконуються згідно з порядком, заданим в параграфі.

Синтаксис додатку:

section-name - ім'я розділу. Може складатися з букв, цифр і знаків підкреслення;

description-text - послідовність символів взятих в лапки;

boolean-expression - логічні вирази, або умови - забезпечують логічне підтримання ведення діалогу. Вони використовуються як частини if-операторів в оголошеннях розділів і поля правил параметрів. Логічні вирази можуть

набувати одного із значень - істина, хиба, невізначено. Вони складаються з:

- логічних параметрів;
- числових відношень;
- відношень між символьними іменами і змінними;
- складених логічних виразів.

Відношення між числовими і символьними змінними записуються через використання реляційних операторів (<, <=, =, >, >=, <>).

Символьні рядки порівнюються посимвольно зліва направо. Порівняння символів здійснюється через використання їх ASCII - кодів.

Складені логічні вирази формуються з використанням логічних операторів: and, or і not. Оператор not має найвищий пріоритет. Оператори and і or мають пріоритет нижчий, ніж в математичних операцій. За допомогою дужок можна змінювати порядок виконання операцій.

Функція know повертає значення «істина», якщо параметр набуває певного значення, і «хиба» - в протилежному випадку.

advice - порада, є результатом обчислення значень параметрів, виконання певної послідовності розділів і параграфів.

text-expression - текстові вирази, використовуються в полях пояснення (explanation field), полях запитань (question field) і в правилах. В розділах текстові вирази використовуються як поради (advice). Текстові вирази утворюються, як суміш рядків символів, значень певних параметрів і текстових функцій. Використання імені параметра дозволяє викликати значення цього параметра, що відображається, як частина складеного тексту. Символ & використовується для вставки в текст нового рядка.

assign - присвоїти, використовується для присвоєння параметру певного значення. Синтаксис:

<assign> ::= assign <parameter-name> := <expression>

Тип результату виразу повинен співпадати з типом параметра.

Використання акції assign дозволяє поєднувати можливості прямого виведення (виведення від фактів до мети, forward chaining) розділів з можливостями зворотного виведення (виведення від мети до фактів, backward chaining) в параметричних правилах.

call - використовується для виклику однієї з вбудованих, чи означених користувачем процедур.

call clear_all() - обнулює значення всіх параметрів поточної бази знань;

call clear_value(<parameter_name>) - обнулює значення конкретного параметра;

call display(<filename>) - виводить на екран вміст текстового файлу;

call hyperadvice(<filename>, <name>) - викликає певний розділ Windows-help файлу;

call save_values(<filename>) - записує в файл значення всіх параметрів;

`call restore_values(<filename>)` - надає параметрам тих значень, які були попередньо записані в відповідний data-файл ;

`call system(<string>)` - використовується для запуску з системи інших DOS і Windows прикладних програм ;

`chain` - дія, що дозволяє системі звернутися до нової бази знань. Синтаксис:

```
<chain> ::= chain <filename>
```

Структурування знань з розподілом їх в окремі бази розширює можливості системи обробки інформації. Значення параметрів можуть передаватися від однієї бази знань до іншої через виконання операції `save_values` перед початком логічного висновку і заданням першої операції в новій базі `restore_values`. Передавати від однієї бази до іншої можна тільки значення параметрів. Якщо параметром операції `chain` буде порожній рядок, то буде виконано перезапуск поточної бази знань.

`do` - виконує передачу контролю до нового розділу, дозволяє виконувати керований пошук інформації між розділами. Іншими словами це не що інше, як пряме виведення. Синтаксис :

```
<do> ::= do <section-name>
```

`do_section_of` - як аргумент нею використовується параметр типу `category`. Ця акція необхідна, як альтернативна до оголошення типу :

```
if <category parameter name> = <option1> do <option1>
```

```
if <category parameter name> = <option2> do <option2>
```

...

Замість великого списку вибору можна записати просто :

```
do_section_of <category parameter name>
```

В процесі консультації саме значення певного параметра визначає, до якого розділу буде передано керування. Тому система намагатиметься визначити значення цього параметра першочергово.

`exit` - ця дія перериває процес консультації по поточній базі знань. Синтаксис :

```
<exit> ::= exit
```

`stop` – необхідна для оптимізації використання правил в розділі. Виконання цієї дії свідчитиме про те, що в розділі виконуватимуться жодні дії і не обчислюватимуться жодні логічні вирази. Дія `stop` допомагає інженеру зі знань уникнути повторного виконання складних умов. Синтаксис :

```
<stop> ::= stop
```

Параметри виконують роль змінних, які контролюють передачу управління між розділами. Будь-який параметр складається із поля оголошення і поля типу. Для опису окремих типів параметрів можна використовувати додаткові поля. Параметр може бути одним із таких чотирьох типів:

- `boolean parameter` (логічний параметр);
- `text parameter` (текстовий параметр);
- `number parameter` (числовий параметр);

- `category parameter` (параметр категорії).

Будь-який параметр може отримати своє значення одним із таких способів :

- в результаті відповіді на запитання системи ;

- як результат кількох правил;

- як результат виконання певних дій (actions).

Логічні параметри використовуються, коли параметр обмежується однією із величин - істина, хиба, або невизначено, частота появи, степінь підтвердження. За замовчуванням система автоматично генерує список вибору (listbox), що відповідає даним величинам.

З допомогою параметрів `declaration field` задають ім'я параметра і текст опису. Текст опису використовується системою для побудови відповідей на запитання користувача типу HOW(ЯК) and WHY(ЧОМУ).

Висновки

Деталізовано і узагальнено застосування метричних представлень, що компонується і нечітких тверджень для формалізації множини висловлювань при надходженні інформації від гетерогенних кейс-базованих джерел із накладеними обмеженнями, що описують вуглеводневі поклади. На основі аналізу метричних ознак виділення вуглеводневих покладів запропоновано методику поетапної формалізації знань експерта з використанням коефіцієнтів впевненості в значеннях істинності висловлювань та тверджень. Представлено рішення з оптимізації обробки входжень в базі кейсів інтелектуальної системи за наявності слабкоструктурованої і неструктурованої інформації за рахунок процедур фільтрації за накладеними множинами обмежень і представлення даних з допомогою розподілу можливостей в заданій ієрархії обмежень. Побудовано гібридні структури знань та даних, що дозволило подолати розрив між представленням знань в кейс-базованій системі і процедурами інференції та солвінгу на множині даних. Розширено можливості процедур інференції по верифікації входжень істинності та хибності на основі гібридного підходу з використанням кейс-базованих запитів при наявності слабкоструктурованості та нечіткості входжень даних предметної області. Узагальнено та інстанційовано використання абстрактних потоків для обробки предикатних конструкцій та абстрагованих типів даних. На базі стандартних предикатних конструкцій побудовано механізм інференції для інтелектуальної системи. Розроблено методику видобування і обробки даних та знань в ході ініціалізуючого діалогу «експерт – база кейсів - інтелектуальна система».

Література

- 1 Гаврилова Т.А. Как стать инженером по знаниях / Т.А. Гаврилова // ВКНИИ, 21-25 ноября 1988г., Переславль-Залесский. - М., 1988. - С.332-337.
- 2 Загоровский И. М. Взаимодействие методов прямого приобретения знаний и обучения на примерах / И. М. Загоровский, В. И. Шалак // КИИ-92. - Тверь, 1992. - С.104-105.
- 3 Минский М. Структура для представления знания / М. Минский // Психология машинного зрения / Под ред. П.Уинстона. - М.: Мир, 1987. - С.249-338
- 4 Вудс У. А. Основные проблемы представления знаний / У. А. Вудс // ТИИЭР. - Т.74, №10. - С.32-46.
- 5 Городецкий Б. Ю. Зевахина Извлечение знаний из текста. Тезаурус текста / Б. Ю. Городецкий, Т. С. Зевахина и др. // КИИ-92. - Тверь, 1992. - С.101-102.
- 6 Quinlan J. Inferno: a cautious approach to uncertain inference // Comput.J. - 1983. - Vol.26. - P.255-269.
- 7 Шер А. П. Согласование нечетких экспертных оценок и функция принадлежности в методе размытых множеств / А. П. Шер. - Владивосток, ДВНЦ АН СССР, 1978. - 143с.
- 8 Инфанов А. П. Формирование концептуальной модели предметной области / А. П. Инфанов, Г. С. Осипов // Вопросы кибернетики. Проблемно-ориентированные вычислительные системы. - М., 1987. - С.103-111.
- 9 Ларичев О. И., Выявление экспертных знаний / О. И. Ларичев, А.И. Мечитов, Е. И. Мошкович, Е.М. Фуремс. - М.: Наука, 1989. - 128 с.
- 10 Zimmermann H.J. Fuzzy set, Decision-Making and Expert System Dordrecht: Kluwer Academic Publ., 1987. - 352 p.
- 11 Финн В. К. Правдоподобные выводы и правдоподобные рассуждения / В. К. Финн // Итоги науки и техники. Сер. теория вероятностей, математическая статистика, теоретическая кибернетика. Т.28. - М.: ВИНТИ, 1988. - С.3-84.
- 12 Кафаров В.В. Принцип описания химико-технологических процессов. Системный анализ процессов химической технологии. Применение метода нечетких множеств / В.В. Кафаров, И. Н. Дорохов, Е.П. Марков. - М.: Наука, 1986. - 390 с.
- 13 Аверкин А. Н., Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / А. Н. Аверкин, И. З. Батыршин [и др.] - М.: Наука, 1986. - С.139-169
- 14 Комаров С. И. Построение моделей предметных областей. Ч.2. Прямое приобретение знаний в системе SIMER / С. И. Комаров, Е. П. Куршев, Г. С. Осипов // Изв. АН СССР. Техн. кибернетика. - 1991. - №3. - С.192-197.
- 15 Юрчишин В. М. Проблеми впровадження експертних систем в нафтогазовидобувній промисловості / В. М. Юрчишин, В. І. Шекета // Доповідь на міжнародному симпозиумі «Комп'ютери в Європі: минуле, сучасне, майбутнє». - Київ. - 1998. - С. 367-372.
- 16 Юрчишин В. М. Прогнозування нафтогазових колекторів з використанням персонального комп'ютера / В. М. Юрчишин, В. І. Шекета // Тези доповіді на науково-практичній конференції. - Полтава. - 1998. - С.127-128.
- 17 Юрчишин В. М. Розробка моделі інформаційних потоків нафтогазовидобувного підприємства / В. М. Юрчишин, Г. О. Жученко, М. В. Крихівський, В. І. Шекета // Тези доповідей на науково-технічній конференції професорсько-викладацького складу університету. - Част.3. - Івано-Франківськ. - 1996. - С. 133
- 18 Шекета В.І. Особливості розробки інтерфейсу експертної системи для прогнозування нафтогазових колекторів / В. І. Шекета // Тези доповідей на науково-технічній конференції професорсько-викладацького складу університету. - Част. 2, Івано-Франківськ. - 1997. - С.190
- 19 Шекета В. І. Формування баз знань для прогнозування нафтогазових колекторів / В. І. Шекета, В. М. Юрчишин // Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. Серія: Технічна кібернетика та електрифікація об'єктів паливно-енергетичного комплексу. - Вип. 33. - Івано-Франківськ. - 1996. - С. 52-55.
- 20 Юрчишин В. М. Перспективи застосування інформаційно-математичного моделювання в нафтогазовидобувній промисловості / В. М. Юрчишин, М. В. Крихівський, В. І. Шекета // Математическое моделирование: Сб. науч. тр. / НАН Украины. Ин-т. математики. - Киев. - 1996. - С. 254-257.
- 21 Юрчишин В. М. Методика визначення коефіцієнта впевненості при виборі правил в базі знань / В. М. Юрчишин, В. І. Шекета, Ю. П. Кропельницький // Математические моделирования и информационные технологии. Сб. научн. трудов НАН Украины. Ин-т математики. - Киев. - 1998. - С.275-276.
- 22 Мальцев А. И. Алгебраические системы / А. И. Мальцев. - М.: Наука, 1988. - 234с.
- 23 Юрчишин В. М. Інформаційне моделювання нафтогазових об'єктів: монографія / Юрчишин В. М., Шекета В. І., Юрчишин О. В. - Івано-Франківськ: Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, 2010. - 196 с.
- 24 Вовк Р.Б. Прийняття рішень у нафтогазовій галузі інструментами теорії обмежень: монографія / Р.Б. Вовк, О.Ф. Козак, В.І. Шекета, В.М. Юрчишин. - Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2017 - 208 с.

Стаття надійшла до редакційної колегії
14.09.18

Рекомендована до друку
професором **Юрчишином В.М.**
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)
д-ром техн. наук **Кузєм М.В.**
(Івано-Франківський інститут права
імені Короля Данила Галицького,
м. Івано-Франківськ)