

# Техніка і технології

УДК 621.791.317.5

## ЗБЕРЕЖЕННЯ ЗАХИСНОГО ПОКРИТТЯ ПРИ З'ЄДНАННІ ОЦИНКОВАНИХ ТРУБ ДУГОВИМ ПАЯННЯМ

О.М. Матвієнків

ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 506612,  
e-mail: ztk@nimg.edu.ua

*З ростом попиту на труби із захисним цинковим покриттям виникає проблема їх з'єднання без пошкодження цілісності покриття. Застосування дугових методів зварювання не може цього забезпечити через високий температурний вплив зварювальної дуги та низьку температуру плавлення цинку. Альтернативою дуговому зварюванню для з'єднання оцинкованих матеріалів може стати дугове паяння.*

*У даній роботі проведено дослідження зони з'єднань труб із захисним цинковим покриттям, визначено характер та ступінь пошкодження покриття. За розрахунками розподілу температури в поперечній площині зварних та паяних швів встановлено, що при дуговому паянні, на відміну від дугового зварювання, немає випаровування цинку в прилеглих до шва ділянках.*

*Встановлено, що розміри ділянок пошкодженого покриття біля шва при дуговому паянні не перевищують дію анодного захисту.*

Ключові слова: дугове паяння, цинкові покриття, корозійна стійкість, температурне поле, корозія.

*С ростом спроса на трубопроводы с защитным цинковым покрытием возникает проблема их соединения без повреждения целостности покрытия. Применение дуговых методов сварки не может этого обеспечить из-за высокого температурного воздействия сварочной дуги и низкой температуры плавления цинка. Альтернативой дуговой сварке для соединения оцинкованных материалов может стать дуговая пайка.*

*Исследована зона соединения труб с защитным цинковым покрытием, определен характер и степень повреждения покрытия. По расчётам распределения температуры в поперечной плоскости сварных и паяных швов установлено, что при дуговой пайке в отличие от дуговой сварки, испарения цинка в примыкающих ко шву участках не наблюдается.*

*Установлено что размеры участков поврежденного покрытия вблизи шва при дуговой пайке не превышают действия анодной защиты.*

Ключевые слова: дуговая пайка, цинковые покрытия, коррозионная стойкость, температурное поле, коррозия.

*With the growing demand for pipes with the protective zinc coating the problem of their connection without damaging the coating integrity arises. The use of arc welding methods cannot provide this because of the high temperature of the welding arc and the low temperature of zinc melting. The alternative to the arc welding for connecting the galvanized materials can be arc brazing.*

*In this paper, the research of pipe connecting with the protective zinc coating has been conducted; the nature and the degree of coating damage have been defined. By calculating the temperature distribution in the rolling plane of welded and brazed joints, it has been discovered that there is no evaporation of zinc in areas adjacent to the welded joint by arc brazing unlike arc welding.*

*It has been discovered that the size of damaged coating areas near the welded joint by arc brazing does not exceed the anode protection operation.*

Keywords: arc brazing, zinc coating, corrosion resistance, temperature field, corrosion.

### Вступ

Останнім часом спостерігається тенденція до зростання попиту на металеві труби із захисним цинковим покриттям. Попри значне поширення сучасні труби із полімерних матеріа-

лів не можуть скласти конкуренції металевим трубам і оцинкованим зокрема.

Завдяки високій стійкості до тривалого впливу високих температур і здатності витримувати високий тиск сталеві труби є незамінними в будівництві різних комунікацій, а також

при транспортуванні та видобутого газу та нафти. Нанесення тонкого шару протикорозійного цинкового покриття продовжує термін експлуатації сталевих труб на десятки років.

Суттєвим недоліком, що обмежує застосування оцинкованих труб, є проблема збереження захисного покриття в місцях їх з'єднання. Найчастіше для сполучення оцинкованих труб застосовують різьбові з'єднання з використанням різноманітних фітінгів, але це є досить затратним та малопродуктивним. Використання традиційних дугових методів зварювання для труб із цинковим покриттям створює певні труднощі, пов'язані з інтенсивним випаровуванням цинку за рахунок високотемпературного впливу дуги. Все це призводить до руйнування покриття на ділянках, прилеглих до шва, та зниження їх корозійної стійкості. Проте найголовнішим недоліком є утворення великої кількості парів цинку, які є шкідливими для здоров'я зварювальників.

Застосування нових сучасних технологій зварювання для з'єднання труб із цинковим покриттям дозволить забезпечити корозійну стійкість з'єднань та покращити умови праці зварювальників.

### **Аналіз літературних даних та постановка проблеми**

Згідно з вимогами ДСТУ Б В.2.6-193:2013 протикорозійні цинкові покриття, залежно від агресивності середовища, наносять на металеві конструкції тонким шаром двома методами: гарячим цинкуванням з отриманням покриття товщиною 60-100 мкм та металізаційним розпиленням з отриманням покриття товщиною 120-150 мкм.

Захисні цинкові покриття найбільш поширені серед інших металевих покриттів завдяки вагомим їх перевагам, а саме:

- цинк має більш від'ємний потенціал, ніж залізо, завдяки чому при взаємодії з вологим атмосферним або рідким середовищем, забезпечує надійний захист від корозії;

- цинкові покриття при взаємодії з агресивним середовищем не відшаровуються, а повільно стоншуються;

- цинкові покриття є більш екологічно безпечні, порівняно з іншими видами захисних покриттів;

- труби та конструкції з цинковим покриттям можуть експлуатуватись протягом десятків років [1].

Як відомо, цинк має досить низьку температуру плавлення, порівняно зі сталлю, що створює певні труднощі при з'єднанні труб із захисним цинковим покриттям традиційними дуговими методами зварювання. Інтенсивне випаровування цинку під час зварювання перешкоджає стабільному горінню дуги та призводить до утворення пор і тріщин у зварному шві, а також спричиняє руйнування захисного покриття в місці з'єднання.

Ділянки шва з повністю або частково зруйнованим цинковим покриттям втрачають

свою антикорозійну стійкість та потребують відновлення покриття, що не завжди є технологічно можливим та потребує додаткових затрат, тим самим підвищуючи собівартість конструкцій.

Відомо, що цинкові покриття, маючи властивості протекторного (анодного) захисту щодо сталі, здатні створювати захист на певній ділянці пошкодженого до металу покриття [2]. При цьому ефективність захисту залежить від ступеня пошкодження покриття.

Проведені в роботі [3] дослідження корозійної стійкості оцинкованих сталей з пошкодженням покриття у вигляді смуг та визначення гальванічних струмів довели що існує критична ширина пошкодження покриття, при якій діє анодний захист. Встановлено, що дія анодного захисту забезпечується, якщо ширина зони пошкодження покриття не перевищує 0,9...1,4 мм за умови, що сам шов володіє достатньою корозійною стійкістю.

Зменшити ступінь руйнування цинкового покриття, а також запобігти появі дефектів у шві при зварюванні оцинкованих матеріалів можна зменшенням теплової потужності дуги до температури, що не перевищує температуру кипіння та випаровування цинку. Це можна реалізувати, застосувавши для з'єднання оцинкованих труб технологію дугового паяння (MIG-паяння), основою якої є низьке вкладення теплоти в основний метал та плавлення тільки присадкового матеріалу [4].

### **Мета роботи**

Метою даної роботи є дослідження впливу термічного циклу дугового паяння та зварювання на ступінь пошкодження захисного покриття. Визначення розмірів пошкоджених ділянок для встановлення ефективності анодної дії покриття.

### **Матеріали, обладнання та методики досліджень корозійної стійкості з'єднань**

Найбільш затребуваними в різних галузях є оцинковані труби діаметром від 15 до 159 мм з товщиною стінки від 2,8 до 4 мм. Щоб оцінити антикорозійні властивості дуго-паяних з'єднань, виготовляли натурні зразки із котушок труб польового магістрального трубопроводу ПМТП-150. Труби даного трубопроводу діаметром 150мм з товщиною стінки 3,2мм виготовляються із низьколегованої сталі марки 16ГС, а корозійний захист забезпечується цинковим покриттям, нанесеним методом гарячого цинкування.

Процес дугового паяння (MIG-паяння) технологічно подібний до процесу дугового зварювання в середовищі захисних газів (MIG/MAG) з тією відмінністю, що плавленню підлягає тільки присадковий дріт, а основний метал або не розплавляється, або розплавляється частково. Все це можна реалізувати при використанні спеціальних присадкових матеріалів та сучасних програмованих джерел живлення.

Таблиця 1 – Хімічний склад та механічні властивості присадкових матеріалів

Марка дроту	C, %	Mn, %	Si, %	Al, %	Ni, %	Cr, %	Cu, %	$\sigma_b$ , МПа	Відносне видовження $\delta$ , %	Ударна в'язкість KCV, Дж/см <sup>2</sup>
CuSi3	–	0,8	2,9	–	–	–	решта	350	40	60
CuAl8	–	0,2	–	8,0	0,3	–	решта	430	40	100
Св-08Г2С	0,08	2,0	0,8	–	0,2	0,2	–	550	30	70

Таблиця 2 – Параметри режиму дугового паяння та зварювання

Метод зварювання	Марка електродного дроту	Діаметр дроту, мм	Напруга на дузі $U$ , В	Зварювальний струм $I_{зв}$ , А	Швидкість зварювання $V_{зв}$ , см/хв	Швидкість подачі дроту $V_{п.д}$ , м/хв
Дугове паяння	CuSi3	1,0	19,0	105	35	5,5
Дугове паяння	CuAl8	1,2	19,4	120	40	3,7
Дугове зварювання	Св-08Г2С	1,2	19	160	28	4,0

Застосування дротів CuSi3 та CuAl8 для паяння-зварювання оцинкованих сталей має такі переваги:

- стійкість зварного шва до корозії (зварний шов майже не кородує);
- незначне розбризування матеріалу;
- мінімальне вигорання цинкового покриття;
- легкоплавкість;
- зварні шви добре піддаються механічній обробці;
- анодний захист основного металу в околі зварного шва.

Ці присадкові матеріали мають досить низьку температуру плавлення (950...1080°C) завдяки високому вмісту міді.

Дугове зварювання та паяння проводилось з використанням присадкових дротів марок Св-08Г2С, а також CuSi3 та CuAl8.

Дроти марок CuSi3 та CuAl8 виготовляються відомими європейськими фірмами за стандартом ISO 24373, а дрот Св-08Г2С – ГОСТ 2246-76. Характеристики даних дротів зведені в табл. 1.

Як захисне середовище для електродугового зварювання використовувалась суміш газу Ar(82 %) + CO<sub>2</sub>(18 %), а для дугового паяння – чистий аргон, тому що використання суміші аргону з активними газами при дуговому паянні збільшує зону руйнування покриття.

Використання сучасних програмованих джерел живлення для дугового паяння дозволяє за рахунок вибору параметрів основного та імпульсного струму досягнути керованого, без короткого замикання, перенесення електродного матеріалу в шов. При оптимальному виборі параметрів у момент кожного імпульсу від дрогового електрода відривається тільки одна крапля присадкового матеріалу, що майже повністю виключає розбризування. Дослідження фірми

«Фроніус» показали, що для різних присадкових матеріалів та захисних газів необхідні різні форми імпульсу [5].

Завдяки режиму «Synergic» можна запрограмувати параметри режиму та керувати за допомогою однієї кнопки, що спрощує обслуговування джерела. Дугове паяння та зварювання зразків проводилось з використанням сучасного зварювального напівавтомата австрійської фірми «FRONIUS» системи TPS-270i, а також зварювального обертача та штатива для закріплення пальника.

Головна відмінність системи TPS-270i від аналогів у своєму класі – це технологія керованого перенесення металу Steel Transfer Technology.

Дугове паяння та зварювання трубних зразків зі скошенням кромки проводилось за два проходи з параметрами режимів, наведеними в таблиці 2.

Щоб оцінити руйнування покриття на прилеглих до шва ділянках та дослідити їх корозійну стійкість, із готових з'єднань було вирізано зразки. Оцінку руйнування покриття проводили після фотознімання поверхні зразків камерою з трикратним збільшенням. Корозійну стійкість з'єднань оцінювали за методикою, викладеною в роботі [6], при безперервному контактуванні зразків з вологою атмосферою в камері з температурою 40°C та відносною вологістю 100%.

### Результати досліджень та їх обговорення

Процес зварювання та дугового паяння супроводжується нагріванням з'єднуваних кромки, потужним тепловим джерелом дуги.

Час перебування металу при температурах, вищих температури кипіння, плавлення та окислення, визначає ступінь пошкодження цинко-

вого покриття. Цей час збільшується за лінійною залежністю зі збільшенням погонної енергії дугового процесу [7].

За характером розподілу температури в навколшовній зоні, а також часом перебування покриття в інтервалі критичних температур, при яких відбувається випаровування та окислення цинку, можна визначити ступінь пошкодження покриття [8].

Щоб оцінити термічний вплив на метал труб при зварюванні та дуговому паянні потрібно провести розрахунок температурного поля, яке, в свою чергу, буде залежати від потужності та типу джерела тепла (зварювальна дуга), а також від форми тіла, на яке буде діяти джерело.

Процес розподілу теплоти в кожній точці та будь-який момент часу описується відомим рівнянням теплопровідності Рикаліна М.М., але для розрахунку теплових процесів при зварюванні цього недостатньо, бо дане рівняння не встановлює залежності температури від просторових координат. Тому для розрахунку диференційного рівняння теплопровідності потрібно задати крайові умови [9].

При розрахунку розповсюдження теплоти такими умовами є початковий розподіл температур в тілі та умови теплообміну – закономірності обміну теплом між тілом (через його поверхні) та оточуючим середовищем.

У літературних джерелах наведено досить багато моделей для розв'язання задач різних технологій зварювання з врахуванням певних крайових умов [10,11], а в нашому випадку дугове паяння та зварювання проводиться рухомих кільцевим джерелом, то для розрахунку температурного поля найбільш підходить модель Кархіна Н.Е. [11].

Розрахункова схема для кільцевого джерела в тонкостінному циліндрі зображена на (рис.1).

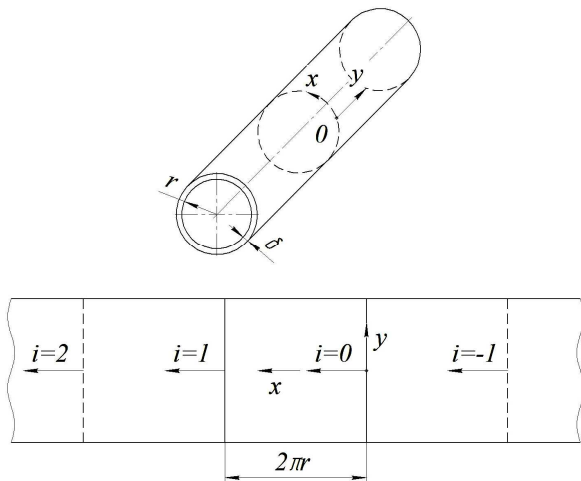


Рисунок 1 – Схема для розрахунку температурних полів тонкостінних циліндрів

Для лінійного рівномірно розподіленого по товщині джерела температурне поле в нескінченно довгому циліндрі у нерухомій системі координат можна розрахувати за рівнянням:

$$T(x, y, t) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} \int_0^t \left\{ \frac{q/\delta}{c\rho[4\pi\alpha(t-\tau)]} \times \exp\left( -\frac{(x-v\tau-i2\pi r)^2 + y^2}{4\alpha(t-\tau)} - b(t-\tau) \right) d\tau \right\}, \quad (1)$$

де  $q$  - теплова потужність джерела, Вт;  
 $\delta$  - товщина стінки труби, см;  
 $c\rho$  - об'ємна теплоємність, Дж м<sup>-3</sup>К<sup>-1</sup>;  
 $\alpha$  - коефіцієнт поверхневої теплопровідності, Вт м<sup>-2</sup> К<sup>-1</sup>;  
 $b$  - коефіцієнт поверхневої температуровіддачі, с<sup>-1</sup>;  
 $t$  - час зварювання, с;  
 $v$  - швидкість руху джерела, м с<sup>-1</sup>;  
 $r$  - радіус труби, см.

Теплова потужність джерела визначається за параметрами режиму паяння та зварювання (табл. 2) за формулою:

$$q = U \cdot I \cdot \eta, \quad (2)$$

де  $U$  - напруга дуги, В;  
 $I$  - сила зварювального струму, А;  
 $\eta$  - коефіцієнт корисної дії процесу нагрівання (для дугового паяння та зварювання  $\eta=0,7$ ).

Розрахунок температурного поля дугового паяння та зварювання проводився з використанням системи комп'ютерної алгебри на базі стандартного пакету Mathcad.

За результатами проведеного розрахунку було побудовано графік розподілу температури в поперечних площинах швів (рис. 2).

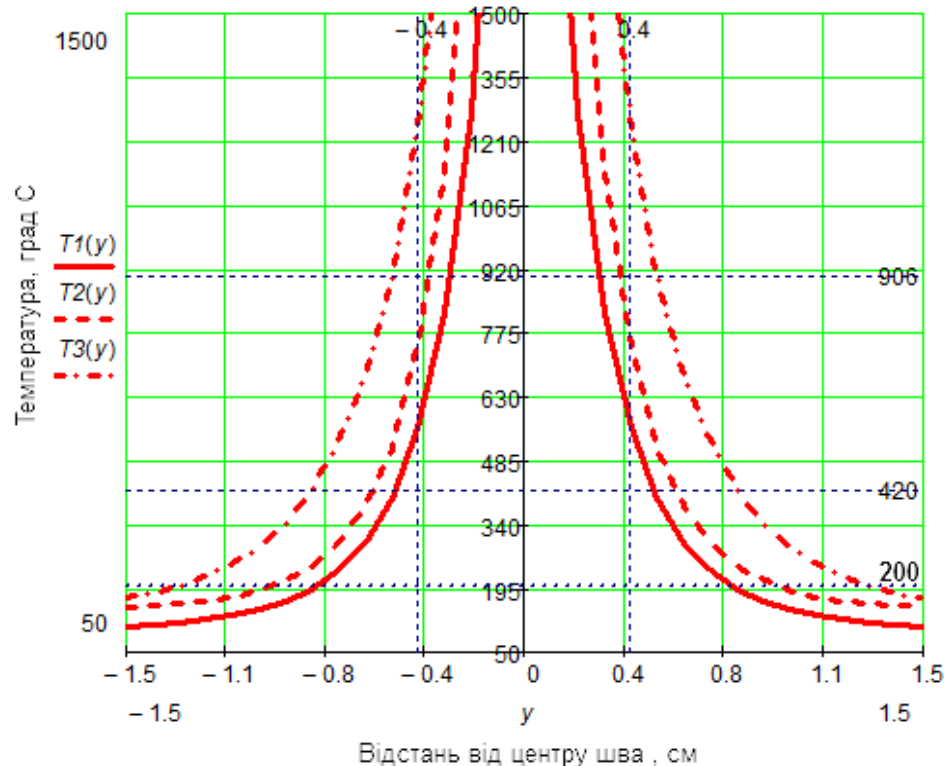
При дуговому паянні та зварюванні труб з цинковим покриттям можливе часткове або повне руйнування покриття в ділянках, прилеглих до шва, через досить низку температуру плавлення та випаровування цинку. Як відомо, окислення цинку починається при температурі 200 °С, плавлення цинку – при температурі ~420 °С, а при температурі ~906 °С починається його інтенсивне кипіння та випаровування. Перебування прилеглих до шва ділянок в інтервалі цих температур характеризує розміри та ступінь пошкодження покриття.

З графіка розподілу температури можна виділити три характерні ділянки пошкодження покриття:

- ділянка кипіння та випаровування (перебування матеріалу при температурі вище 906 °С);
- ділянка розплавлення (420–906 °С);
- ділянка окислення (200–420 °С).

Після оброблення графіка розподілу температури в графічному редакторі КОМПАС 3D було визначено розміри ділянок пошкодження покриття, а також зроблено знімки зовнішньої поверхні з'єднань, на яких виділено ділянки пошкодження покриття та їх розміри (рис. 3).

Ділянка кипіння характеризується значним пошкодженням захисного покриття (аж до відсутності) через інтенсивне випаровування цинку, бо воно перебуває в інтервалі температури, що перевищує температуру кипіння цинку. Дана ділянка спостерігається тільки на зразку, виконаному дуговим зварюванням (рис. 3в),



T1 – дугове паяння дротом CuSi3;  
 T2 – дугове паяння дротом CuAl8;  
 T3 – зварювання дротом Св-08Г2С

**Рисунок 2 – Розподіл температури в поперечних площинах зварних та паяних швів**

а на зразках, виконаних дуговим паянням, вона відсутня. Це пояснюється тим, що при дуговому паянні застосовуються електродні дроти на основі міді, які мають значно нижчу температуру плавлення (~ 1100 °С), яка є меншою від температури плавлення сталі (~ 1500 °С), а, відповідно, і теплова потужність джерела буде також меншою. Як бачимо з графіка (рис. 2), при дуговому паянні прилеглі до шва ділянки не потрапляють до зони критичної температури (вище 906 °С).

На ділянці випаровування можна спостерігати скупчення цинку з вкрапленням міді (при дуговому паянні) (рис.3а,б), що створює певне потовщення покриття. Це пояснюється тим, що цинкове покриття перебуває в інтервалі температур, які перевищують температуру його розплавлення, тому на даній ділянці пошкодження покриття є незначними.

Найменшого температурного впливу зазнає покриття на ділянці окислення, яка перебуває в інтервалі температур окислення цинку, тому на даній ділянці можна спостерігати лише незначне окислення цинкового покриття.

Ширина пошкоджених ділянок збільшується зі збільшенням потужності теплового джерела, а проведені дослідження підтверджують залежність пошкодження покриття від температури, що також показано в роботах [4, 5].

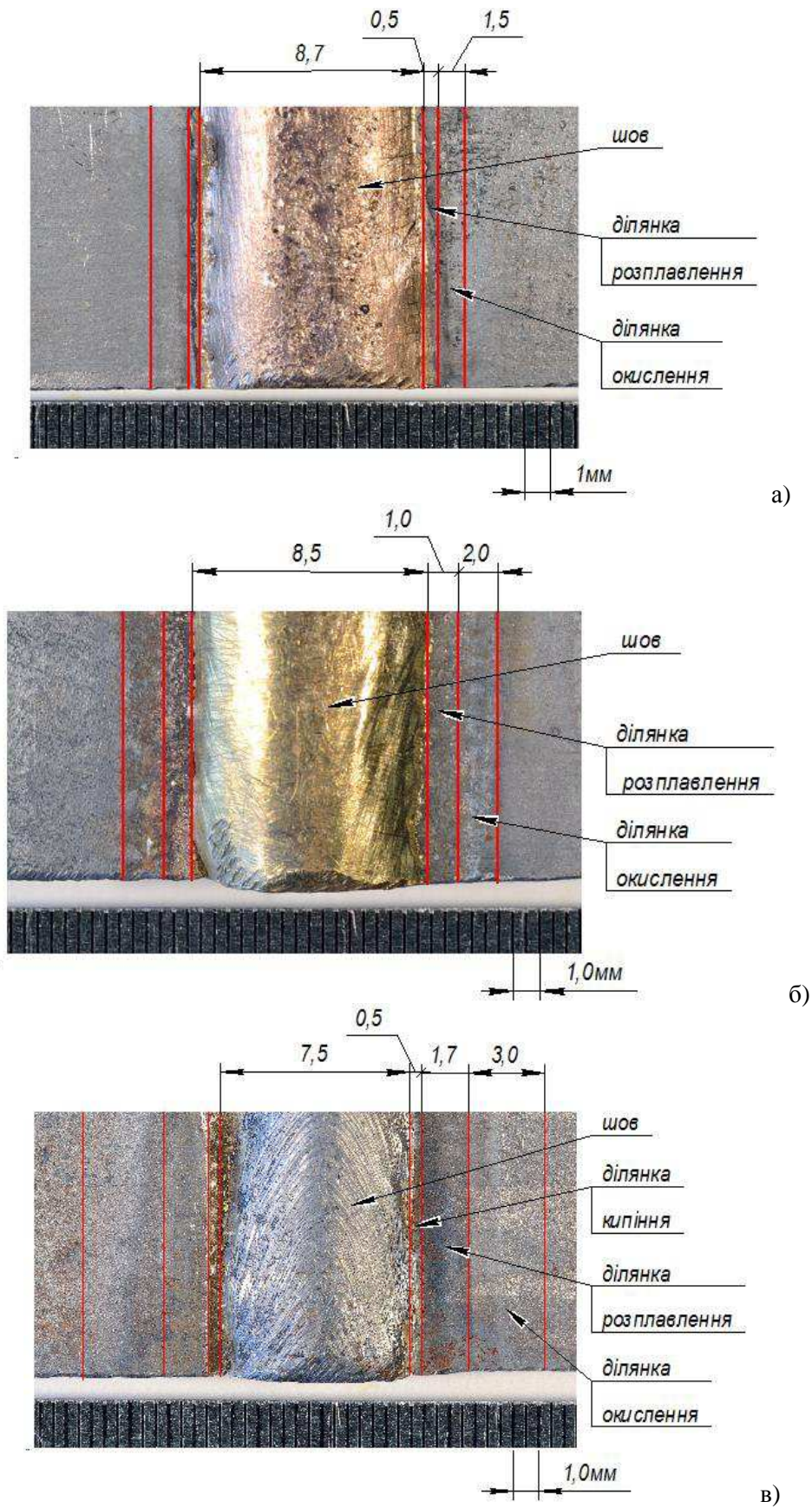
Як бачимо, при дуговому паянні ширина ділянки з найбільшими пошкодженнями покриття не перевищує 1мм та потрапляє під дію анодного захисту.

Корозійну стійкість з'єднань оцінювали візуальним оглядом зразків (рис. 3) після випробувань у камері вологості.

На знімках поверхні з'єднань бачимо, що найбільше пошкоджений корозією зразок, виконаний дуговим зварюванням (рис. 4в), на якому спостерігаються сліди корозії в так званій ділянці кипіння та випаровування цинку, а також помітна біла корозія на ділянці окислення, яка є характерною для цинкових покриттів. Зразки з'єднань дугового паяння виявилися стійкими до корозії, лише на зразку, виконаному дротом CuAl8 (рис. 4б), можна спостерігати незначні сліди білої корозії ділянки окислення.

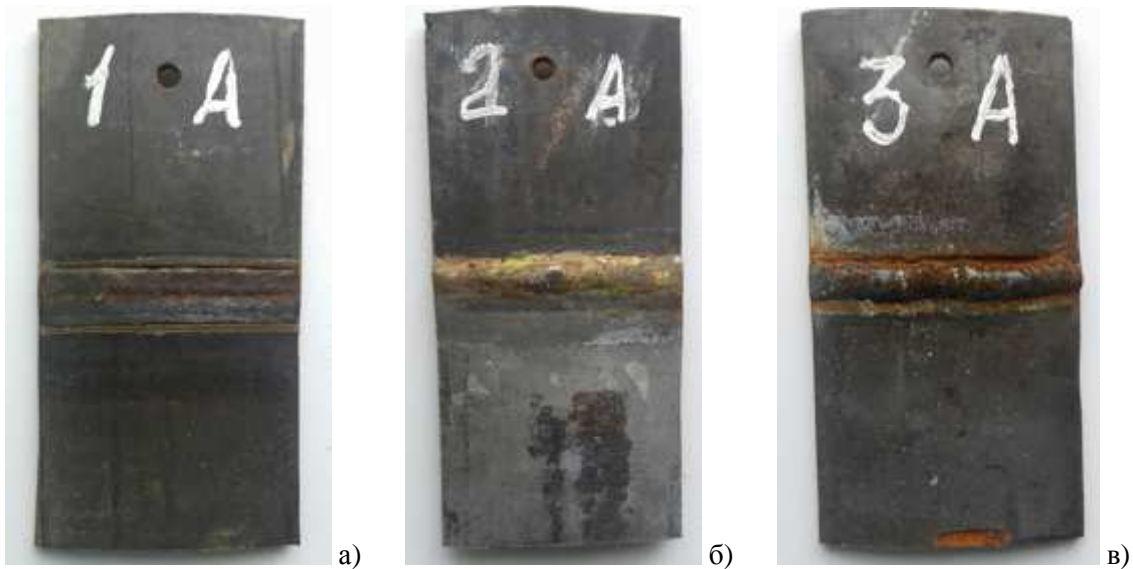
Отже, корозійні випробування підтверджують встановлені залежності та характер руйнування покриття від температурного впливу дуги. Проведені дослідження показали, що при дуговому зварюванні труб з цинковими покриттями сам шов не є корозійностійким, а покриття в прилеглих ділянках руйнується. На відміну від дугового зварювання, застосування дугового паяння для з'єднання оцинкованих труб забезпечує корозійну стійкість швів та цілісність захисного цинкового покриття у прилеглих ділянках.

Але, як відомо, продукти транспортуються трубопроводами з робочим тиском, що може досягати 10 МПа, тому також потрібно провести дослідження напружено-деформованого стану дуго-паяних з'єднань, що може стати перспективним напрямком подальших досліджень.



а - паяне дротом CuSi3 з'єднання; б - паяне дротом CuAl8 з'єднання;  
в - зварене дротом Св-08Г2С з'єднання

**Рисунок 3 – Зовнішні поверхні з'єднань оцинкованих труб з виділеними ділянками пошкодження цинкового покриття (трикратне збільшення)**



а - паяне дротом CuSi3з'єднання; б - паяне дротом CuAl8з'єднання;  
в - зварене дротом Св-08Г2С з'єднання

**Рисунок 4 – Поверхні зразків з'єднань після корозійних випробувань**

### Висновки

Визначено характер пошкодження покриття у прилеглих до шва ділянках при дуговому паянні та зварюванні труб із цинковим покриттям та встановлено:

1) при дуговому паянні, на відміну від дугового зварювання, захисне покриття не випаровується, а можливе лише розплавлення цинку в прилеглих до шва ділянках за рахунок меншого температурного впливу;

2) ділянка найбільшого пошкодження покриття при дуговому паянні має ширину, що не перевищує 1мм та підпадає під дію анодного захисту;

3) корозійна стійкість з'єднань оцинкованих труб, виконаних методом дугового паяння, є набагато вищою від стійкості зварних з'єднань, а також самі шви є корозійно стійкими.

Отже, проведені дослідження та встановлені залежності пошкодження цинкового покриття від температурного впливу дуги дозволяють зробити висновки, що застосування дугового паяння для з'єднання матеріалів з цинковим покриттям дозволить зберегти цілісність покриття та забезпечити корозійну стійкість швів та прилеглих до них ділянок.

Дугове паяння можна застосовувати при виготовленні та ремонті польових магістральних трубопроводів, технологічних трубопроводів та мереж з оцинкованих труб.

### Література

1 Родионова Л. В. Преимущества и недостатки способа горячего оцинкования стальной полосы. Проблемы цинкования [Электронный ресурс] / Л. В. Родионова, Ю. М. Суботина // Russian Internet Journal of Industrial Engineering. – 2013. – Режим доступа:

<https://www.google.com.ua/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ahUKewi9iu3Qk-nMAhXCWiwKHxOBB8IQFggdMAA&url=http%3A%2F%2Findust-engineering.ru%2Fissues%2F2013%2F2013-2-1.pdf&usq=AFQjCNHawUMhWUIK1WpNvfo-smUCuDjguA&sig2=5hwXXP0qGDtewJ9beE5pig&cad=rja>.

2 Семенова И. В. Коррозия и защита от коррозии / И. В. Семенова, Г. М. Флорианович, А. В. Хорошилов. – Москва: Физматлит, 2006. – 376 с.

3 Лупачёв А. В. Дуговая сварка и пайка оцинкованных узлов теплотрасс и их коррозионная стойкость [Текст] / А. В. Лупачёв // Вестник полоцкого государственного университета. – 2012. – №3. – С. 21–27. Режим доступа: <http://elib.psu.by:8080/handle/123456789/477>

4 GMA Brazing of Galvannealed Interstitial-Free Steel / B. S.Basak, T. K. Pal, M. Shome, J. Maity. // Welding journal. – 2013. February, Vol. 92, P. 29–35.

5 Бондаренко В. Л. Инверторное оборудование с частотой преобразования более 100кГц и цифровым управлением [Текст] / В. Л. Бондаренко // Сварщик. – 2007. – №6. – С. 21–23.

6 Mig brazed hot-dip galvanized sheets / [J. Vinas, L. Kascak, M. Abel] // Lebanese Science Journal. – 2010. – Vol. 11, Issue 2. – P. 75–85.

7 Варнак А. Г. Оценка антикоррозионных свойств сварного соединения труб и профилей, изготовленных из оцинкованной рулонной стали на непрерывном ТЭСА [Текст] / А. Г. Варнак, О.В.Варнак, Т. Н. Чурикова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2016. – №2. – С. 98–105.

8 Павлюк С. К. Закономерности процесса повреждения и разрушения цинкового покрытия на стали при сварке плавлением и дуговой пайке [Текст] / С. К. Павлюк, А. В. Лупачёв, Ю. А. Цумарев // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2008. – №2. – С. 76–84.

9 Негода Е. Н. Тепловые процессы при сварке: учеб. пособие [Текст] / Е. Н. Негода. – Дальневосточный государственный технический университет: Изд-во ДВГТУ, 2008. – 125 с.

10 Василик А. В. Теплові розрахунки при зварюванні [Текст] / А. В. Василик, Я. А. Дрогомирецький, Я. А. Криль. – Івано-Франківськ: Факел, 2004. – 209 с.

11 Кархин В. А. Основы теплопередачи при сварке и пайке: учебное пособие [Текст] / В. А. Кархин. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2011. – 95 с.

*Стаття надійшла до редакційної колегії*

*09.11.16*

*Рекомендована до друку*

*професором Грудзом В.Я.*

*(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)*

*канд. техн. наук Пилипченком О.В.*

*(ТОВ «МНВЦ Еліпсон ЛТД»,*

*м. Івано-Франківськ)*

## РЕЗУЛЬТАТИ ПРОМИСЛОВИХ ВИПРОБУВАНЬ УСТАТКУВАННЯ ДЛЯ ДЕМОНТАЖУ ПОШКОДЖЕНОГО ОБЛАДНАННЯ ПРИ ЛІКВІДАЦІЇ ВІДКРИТОГО НАФТОГАЗОВОГО ФОНТАНУ

*І.В. Добровольський*

*ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 727101,  
e-mail: no@nimg.edu.ua*

*Щоб прискорити процеси ліквідації відкритих фонтанів необхідно розробляти нове високоефективне устаткування та вдосконалювати існуюче. Рекомендувати нове обладнання до використання у виробництві слід за результатами його промислових випробувань.*

*Випробування нового устаткування для демонтажу пошкодженого обладнання проводились на діючому газовому полігоні ДП „ЛІКВО” НАК „Нафтогаз України” у відповідності до затвердженої Програми і методики. Метою випробувань було відпрацювання різноманітних конструктивних виконань гідропіскоструминного різачка під час відрізання трубних головок, які найбільш широко використовуються в нафтогазовидобувних компаніях України.*

*Під час промислових випробувань визначено стійкість до гідроабразивного розмивання трьох конструкцій різаків та трьох видів насадок. Найкращими показниками володіють різак з гнутими трубами та насадка з направляючим конусом.*

*Ключові слова: ліквідація нафтогазових фонтанів, відкритий фонтан, гирлове обладнання, трубна головка, гідроабразивна установка, гідроабразивне різання.*

*Для ускорения процессов ликвидации открытых фонтанов необходима разработка нового высокоэффективного оборудования и совершенствование существующего. Рекомендовать новое оборудование для использования в производстве следует по результатам его промышленных испытаний.*

*Испытания новых установок для демонтажа поврежденного оборудования проводились на действующем газовом полигоне ГП "ЛИКВО" НАК "Нафтогаз Украины" в соответствии с утвержденной Программой и методикой. Целью испытаний являлась отработка различных конструктивных исполнений гидрорезающего резака при отрезании трубных головок, наиболее широко используемых в нефтегазодобывающих компаниях Украины.*

*При промышленных испытаниях определена устойчивость к гидроабразивному размыванию трех конструкций резаков и трех видов насадок. Лучшими показателями обладают резак с гнутыми трубами и насадка с направляющим конусом.*

*Ключевые слова: ликвидация нефтегазовых фонтанов, открытый фонтан, устьевое оборудование, трубная головка, гидроабразивная установка, гидроабразивное резание.*

*To accelerate the open flow liquidation processes it is necessary to develop new highly efficient equipment and to improve the existing ones. New equipment should be recommended due to the results of its industrial tests.*

*The tests of new equipment for the removal of the damaged equipment were carried out at the existing gas landfills of LIKVO State Company Naftogaz Ukrainy NJSC in accordance with the approved programs and methods. The purpose of tests were the development of various designs of the abrasive jet cutter when cutting casing heads, which are widely used in the oil and gas companies of Ukraine.*

*During industrial tests the resistance of three designs of cutters and three types of casing heads to hydroabrasive diffusion has been defined. The best properties belong to a cutter with curved pipes and a jet with a guide cone.*

*Keywords: oil and gas flow liquidation, open flow, wellhead equipment, casing head, hydroabrasive equipment, abrasive waterjet.*

**Вступ.** Фонтанування на експлуатаційних та споруджуваних свердловинах створюють катастрофічну загрозу виникнення аварій. Для прискорення ліквідації відкритих нафтогазових фонтанів потрібно розробляти нове високоефективне технічне устаткування та методи (технології) його використання, а також вдосконалювати існуюче обладнання. У статті подається інформація про результати промислових випробувань нового устаткування, яке використовується для демонтажу пошкодженого гирлового обладнання при відкритому фонтануванні.

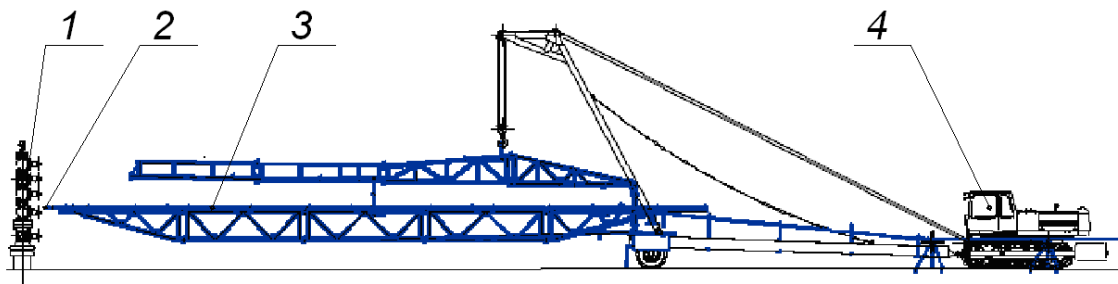
**Метою випробувань** є відпрацювання нового обладнання та технології відрізання трубної головки гідроабразивною установкою під

час ліквідації відкритих нафтогазових фонтанів.

Роботи проводили на діючому газовому полігоні ДП «ЛІКВО» у відповідності до затвердженої Програми і методики відпрацювання режимів і технології різання гирлового обладнання гідропіскоструминним різачком.

Під час випробування використовували таке обладнання:

- гідроабразивна установка (рис. 4.1) – 1 комплект;
- нагнітальна лінія з фільтром та манометром – 1 комплект;
- піскозмішувач УСП-50М – 1 комплект;
- дозатор піску – 1 шт.;
- цементувальний агрегат ЦА-320 – 2 шт.;



1 – пошкоджене обладнання на гирлі свердловини; 2 – різак; 3 – стріла; 4 – кран КП-25.

**Рисунок 1 – Загальний вигляд установки для гідроабразивного різання**

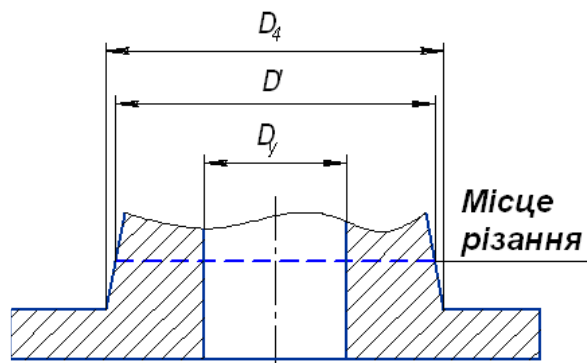
**Таблиця 1 – Геометричні параметри трубних головок**

№ з/п	Найменування трубної головки	Зовнішній діаметр шийки в площині зрізу, $D'$ , мм	Внутрішній діаметр шийки, $D_y$ , мм	Площа різання, мм
1	180×350-280×350	369	180	81493,7
2	180×700-280×700	300	160	50579,6
3	156×320-280×210	320	156	61311,3
4	156×320-280×350	320	156	61311,3
5	180×700-280×700 (CAMERON)	440	180	126606,2

- цементувальний агрегат АСФ-700 – 2 шт.;
- кварцовий пісок – 10 т;
- автокран – 1 шт.

Технологію відрізання гирлового обладнання відпрацьовували на трубних головках трьох типорозмірів, якими обладнано більшість гирлового обладнання в Україні (таблиця 1).

Принципову схему визначеного місця різання трубної головки наведено на рис. 2



$D_4$  – діаметр шийки;  $D'$  – діаметр шийки в місці різання;  $D_y$  – умовний прохід

**Рисунок 2 – Принципова схема місця різання трубної головки**

**Постановка задачі та вибір методів дослідження.** Схему розташування обладнання під час промислових випробувань наведено на рис. 3.

Перед початком робіт проводили гідрравлічні випробування на герметичність з'єднань трубопроводу високого тиску – від агрегатів до різача – на тиск 50 МПа: впродовж 15 хв. падіння тиску не було.

Щоб вибрати найстійкішу до гідроабразивного розмивання конструкцію різача та насадки, розглядали декілька конструкцій різальних пристроїв:

- різак гідроабразивний прямий;
- різак гідроабразивний з буферною камерою;
- різак гідроабразивний з гнутими трубами.

**Основний матеріал дослідження.** На першому етапі випробувань застосовували різак гідроабразивний прямий оснащений насадкою з стопорним кільцем. В місці встановлення стопорного кільця створювали турбулентність, яка призводила до ерозійного зношування в протоці під кільце (рис. 4).

Під час промислових випробувань відрізання трубної головки даний різак відпрацював дві години, після чого насадки на виході набула форми дифузора з осьовим зміщенням (рис. 5). При цьому струмінь розпилювався, і розрізання металу стало неможливим. Також за рахунок зміни напрямку потоку водопіщаної суміші в різачу відбувалось одностороннє розмивання кінцевої різьби (рис. 6).

Щоб запобігти розмиванню насадки по стопорному кільцю, застосовували насадку з коноїдальним направляючим кільцем (рис. 7). Струмінь формувався більш плавно, але при цьому кінчна різь розмивалась.

Щоб зменшити динаміку розмивання на повороті на насадку, було застосовано різак з буферною камерою, оснащений насадкою з коноїдальним направляючим кільцем. Розмивання насадки та різьби різача з буферною камерою (рис. 8) мало аналогічний характер, як і без буфера, але форма струменю була більш рівномірною на вході в насадку, завдяки чому дана

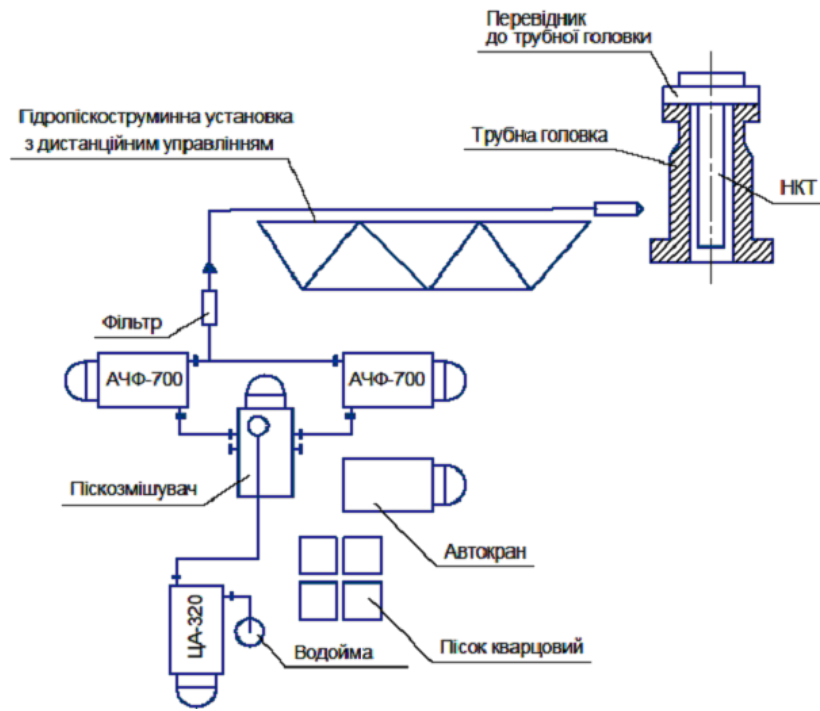


Рисунок 3 – Схема розташування обладнання під час проведення промислових випробувань



Рисунок 4 – Розмивання стопного кільця



Рисунок 5 – Змінена форма насадки



Рисунок 6 – Одностороннє розмивання конічної різьби



Рисунок 7 – Насадка з конідаьним направляючим кільцем



Рисунок 8 – Фактичне розмивання різачка з буферною камерою

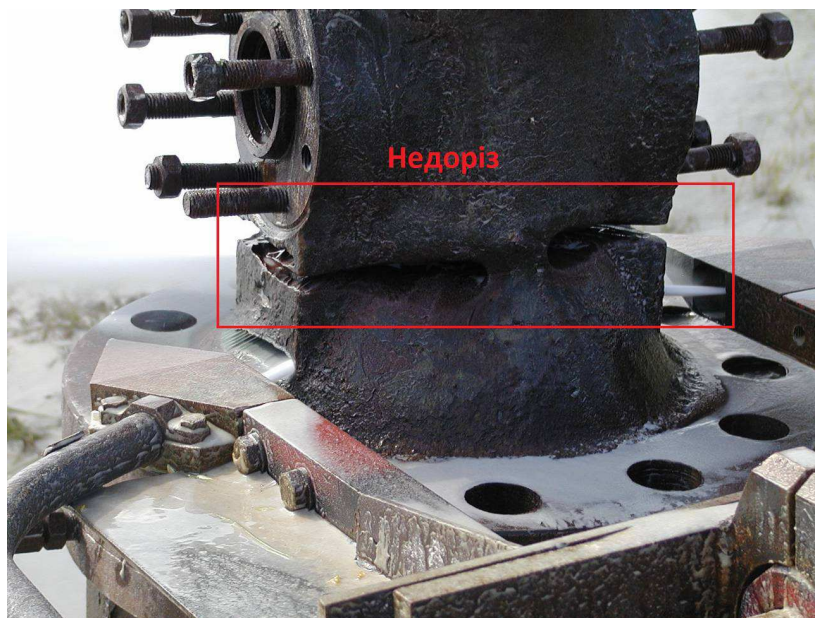


Рисунок 9 – Неповне прорізання трубної головки за 3 години роботи різачка з буферною камерою

конструкція перфатора працювала близько трьох годин без втрати роботоздатності, тобто була в 1,5 рази більш ефективною у порівнянні з роботою гідроабразивного прямого різачка, обладнаного насадкою з стопорним кільцем.

За допомогою різачка з буферною камерою за три години було відрізано 90 % трубної головки (рис. 9).

Для проведення аварійних робіт на свердловинах необхідно створити конструкцію різачка, яка б працювала в два – три рази довше, ніж триває відрізання трубної головки, тобто час роботи різачка без втрати робочих характеристик повинен становити приблизно 6-8 годин.

Найновішою конструкцією різачка був різальний пристрій з гнутими трубами та насадкою з направляючим конусом (рис. 10, 11). Дана конструкція різачка відпрацювала близько десяти годин. При цьому різак, різі та насадки з твердого сплаву майже не розмивались. Дана конструкція повністю відповідає тим вимогам, які висуваються до різачка, який використовується для ліквідації аварій.

Конструкція різачка з гнутими трубами створена таким чином, що кожна насадка відрізає половину деталі, до якої вона розміщена ближче.

Щоб підвищити надійність відрізання трубної головки, конструкцію різачка створено та-

ким чином, що повертання насадок на певний кут виключає можливість взаємного перетинання струменів (рис. 11). Тобто різальна здатність кожного окремого струменя, що діє на дві половини однієї деталі гирлового обладнання, забезпечує необхідну ефективність різання деталі загалом шляхом додаткового перетинального дорізання протилежної частини деталі.

Результати різання трубних головок різних типів з використанням різних конструкцій різачків наведено в таблиці 2.

Трубні головки типорозмірів 180×350-280×350 (1), 180×700-280×700 (2), 156×320-280×210 (3), 156×320-280×350 (4) різали за робочого тиску 30 МПа. Такий вибір робочого тиску був обумовлений часом роботи гідропіскоструминного різачка. Однак за три години трубні головки були не дорізані (рис. 9) через недостатню стійкість різальних насадок.

У ході дослідів № 4, 5, 6 різачка переміщали через чіткі інтервали, контролюючи при цьому фактичний процес різання періодичними зупинками.

Однак площа різання залишалась нерівномірною, оскільки в металі існують внутрішні напруження, які спричиняють нерівномірне вимивання металу. Хоч метал вже був прорізаний, на виході з зони різання був отриманий дуже розпилений струмінь. Саме таке розпи-



Рисунок 10 – Насадки з направляючим конусом



Рисунок 11 – Робота різача з гнутими трубами

Таблиця 2 – Результати різання трубних головок

Номер досліджу	Типорозмір трубної головки	Тиск нагнітання, Р, МПа	Загальний час різання, год	Примітка
1	180×350-280×350	30	≈ 3	Не дорізано
2	180×700-280×700	30	≈ 4	Не дорізано
3	156×320-280×210	30	≈ 3,5	Не дорізано
4	156×320-280×350	30	6,18	Відрізано
5	156×320-280×210 повторне різання	45	3,31	Відрізано
6	180×700-280×700 (CAMERON)	45	2,95	Відрізано

лювання в перших дослідях змусило затримувати різак на даному інтервалі.

Після застосування конструкції різача з гнутими трубами з'явилась можливість підвищити тиск до 45 МПа (дослід № 5, 6). Трубну головку вдалось перерізати (дослід 4), оскільки різак залишався працездатним протягом 6 год без видимого зношення.

Крок переміщення різача склав 5 мм (рис. 12). На рис. 13 та 14 подаються наглядні схеми різання трубних головок типорозмірів 156×320-280×350 (210) та 180×700-280×700 (CAMERON).

Графік зміни відстані від різача до тіла трубної головки представлений на рис. 15.

Фактично отриманий час різання трубних головок та площі різання при кожному переміщенні представлено на рис. 16, 17 та 18.



Рисунок 12 – Крок переміщення різачка до повного відрізання

Трубні головки 180×350-280×350, 180×700-280×700, 156×320-280×210 відрізали різачками та насадками різних типів. При цьому три трубні головки (дослід №1, 2, 3) були недорізані приблизно на 20 – 30 % через розмивання насадок.

Після цього було випробувано різак з гнучкими трубами, яким було успішно відрізано три трубні головки.

Під час теоретичних досліджень весь процес різання гирлового обладнання поділено на 9 зон (рис. 19). На графіках різання трубних головок (рис. 16, 17, 18, 19) можна помітити відмінність у різанні двох основних зон: у зоні 2 – прорізання максимальної товщини стінки та у зоні 7 – оптимальне різання основного тіла (струмінь спрямований перпендикулярно до зовнішньої поверхні) та НКТ:

дослід № 4 – 300/150;

дослід № 5 – 240/120;

дослід № 6 – 180/60.

Таку закономірність можна віднести до всіх трубних головок з підвищеною колоною НКТ, які необхідно відрізати при ліквідації аварій (фонтанів).

Застосування даного пристрою є значно ефективнішим за інші способи демонтажу пошкодженого обладнання, зокрема за відстрілювання танком. Так, наприклад, для відстрілювання трубної головки на свердловині № 100 Куличихінського ГКР було проведено 5 пострілів, № 8 Розумівського ГК Р було проведено 8 пострілів, № 111 Куличихінського ГКР було проведено 24 постріли. Усі трубні головки після пострілів були сильно пошкоджені, що значно

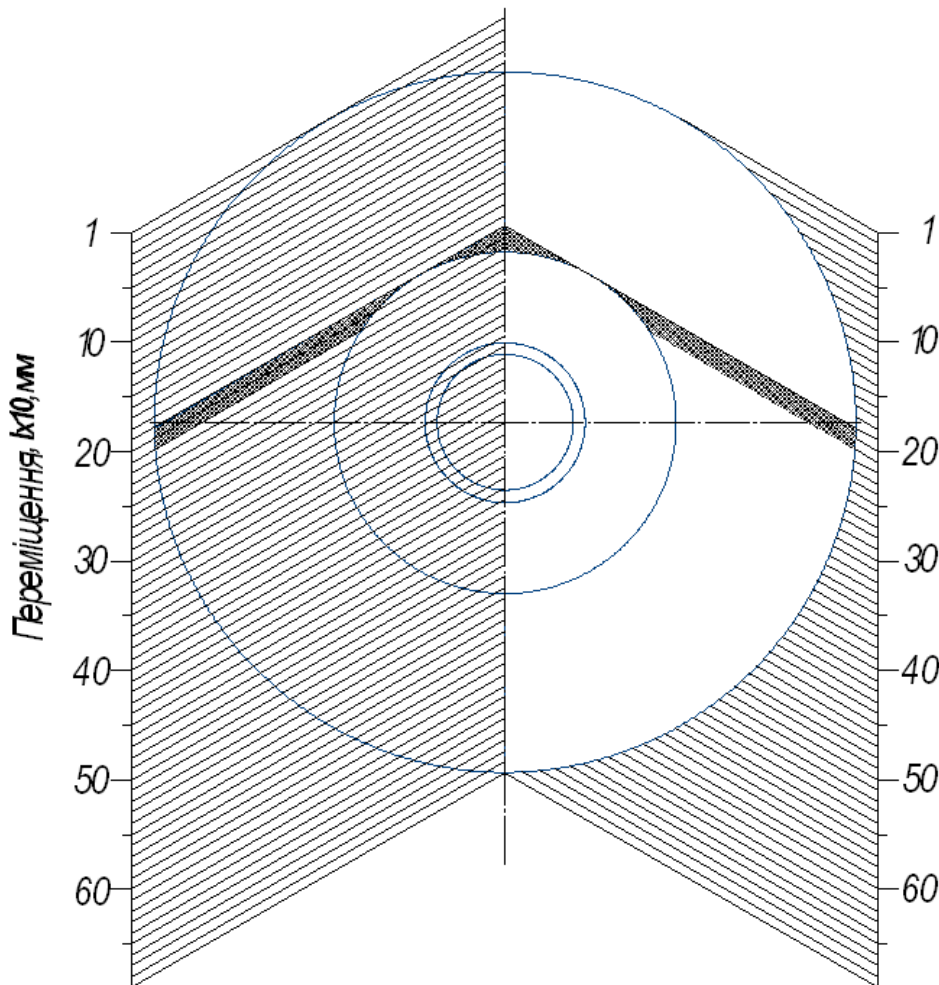


Рисунок 13 – Схема різання трубної головки 156×320-280×350 (210)

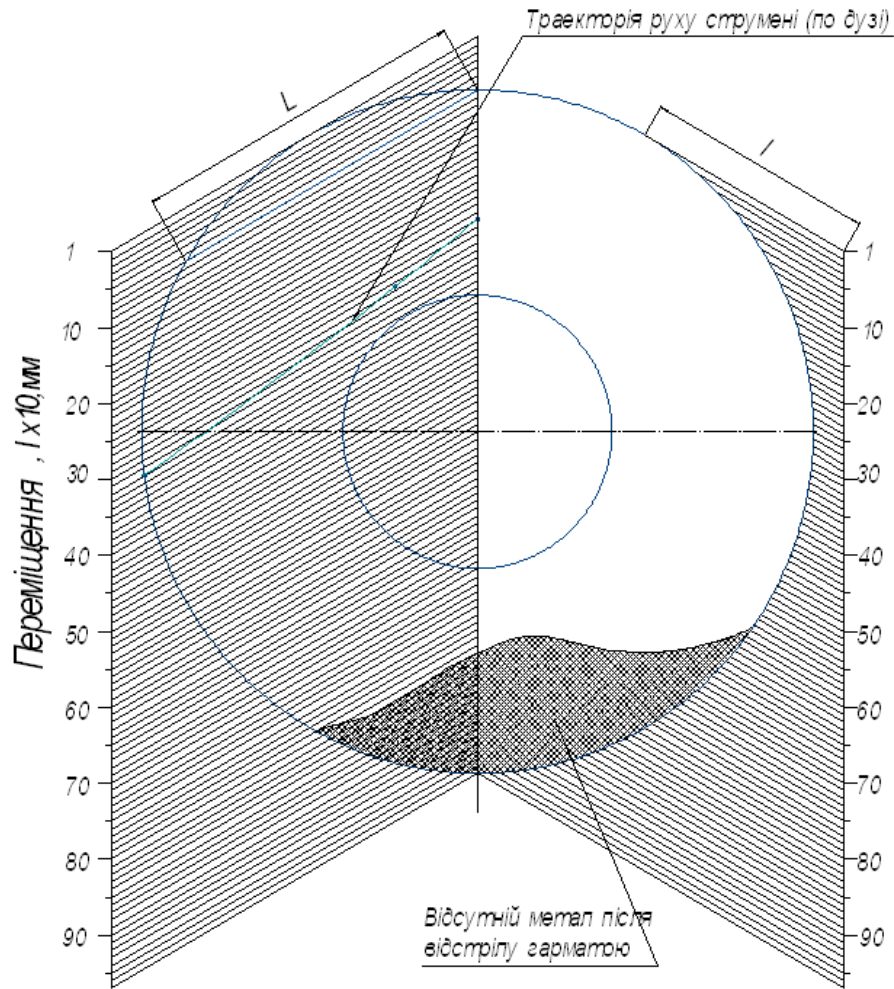


Рисунок 14 – Схема різання трубної головки 180x700-280x700 (CAMERON)

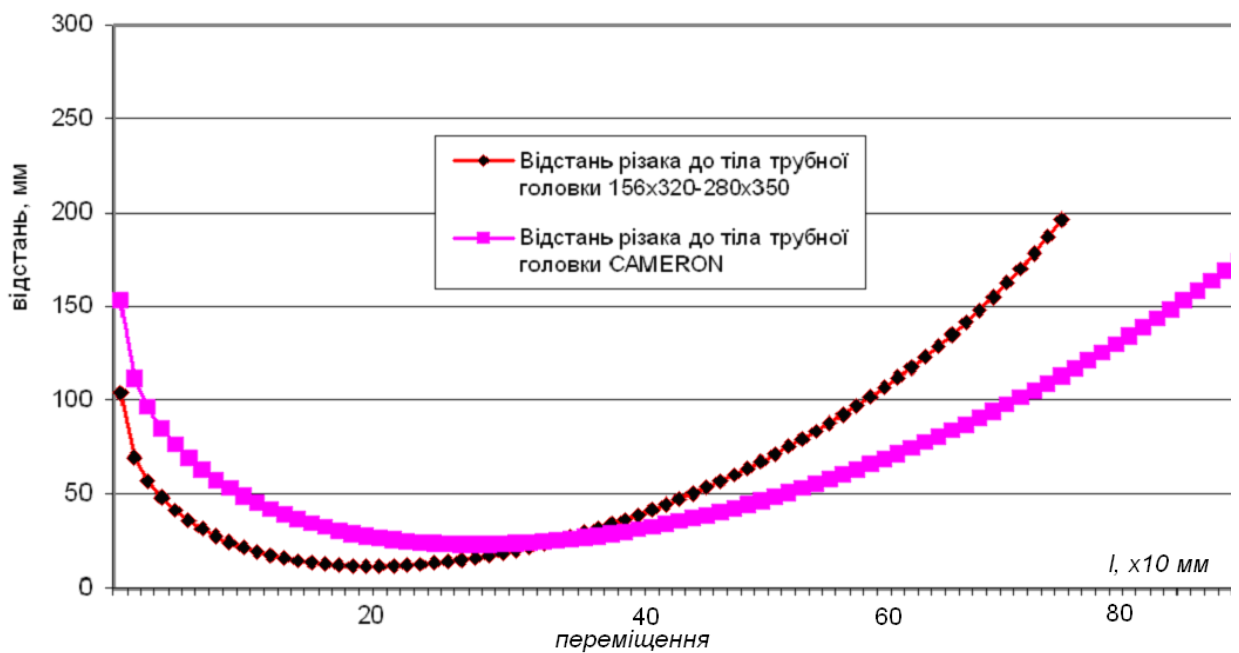


Рисунок 15 – Графік зміни відстані від різача до тіла трубної головки

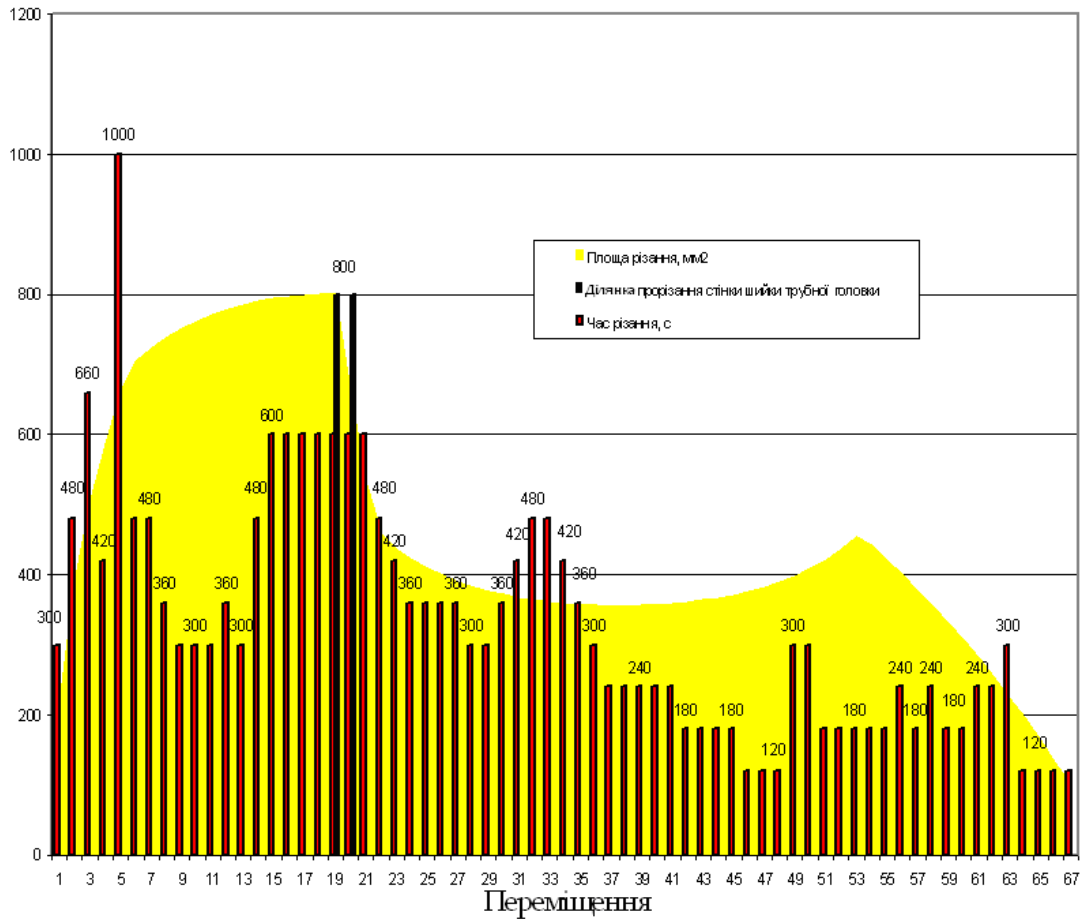


Рисунок 16 – Діаграма різання трубної головки 156x320-280x210

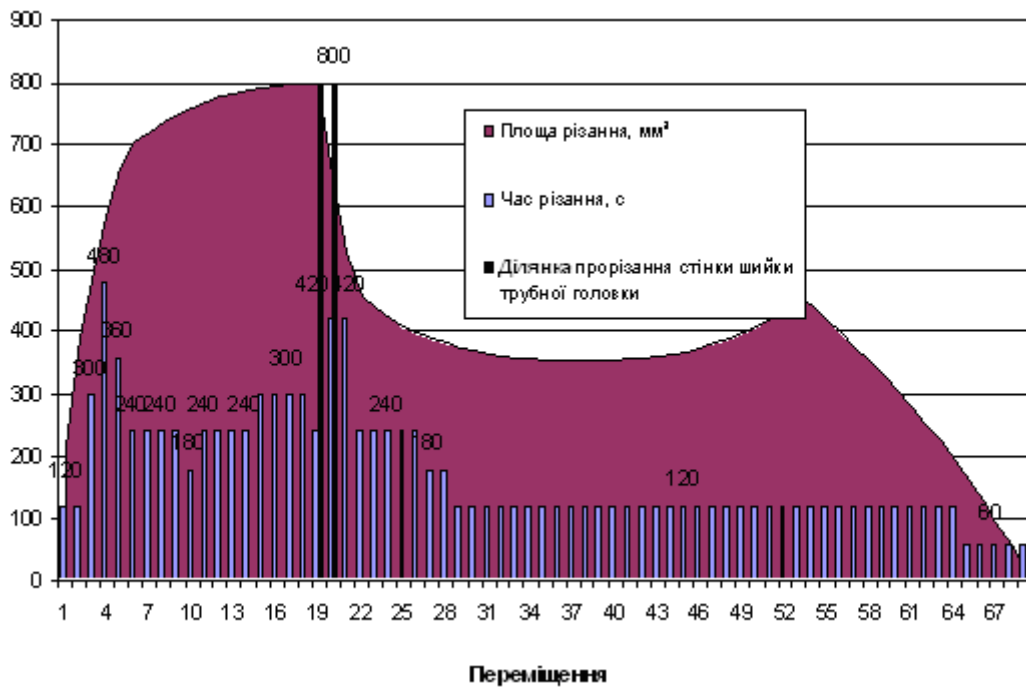


Рисунок 17 – Діаграма різання трубної головки 156x320-280x350

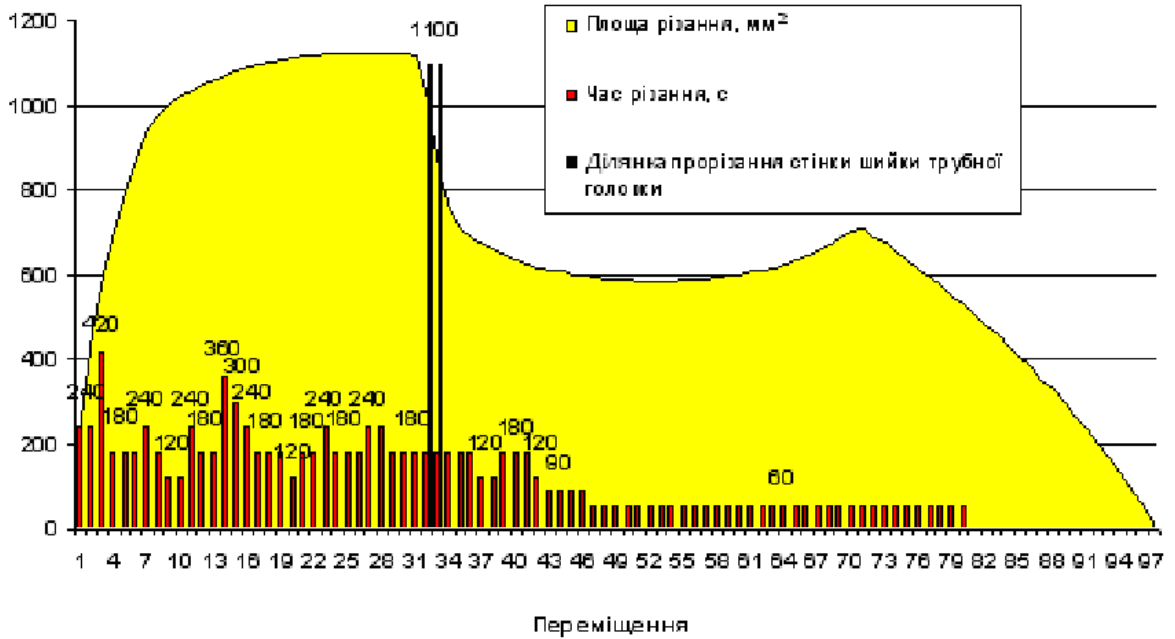


Рисунок 18 - Діаграма різання трубної головки 180×700-280×700 (CAMERON)

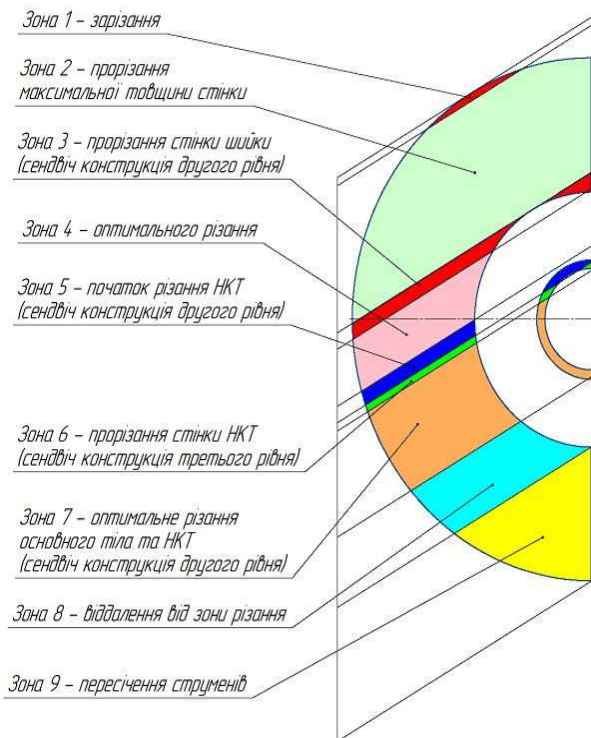


Рисунок 19 – Зони різання гирлового обладнання

ускладнило подальші роботи з ліквідації фонтану (рис. 20). А гідроабразивний спосіб виключає будь-які пошкодження і проводиться у визначеному місці і є максимально безпечними для ліквідаторів.



Рисунок 20 – Порівняння двох методів відрізання трубної головки 180×700-280×700 “CAMERON”

### Висновки

В ході промислових випробувань було відпрацьовано відрізання трубних головок гідроабразивним методом. Відпрацювання устаткування для відрізання гирлового обладнання проводилась на трубних головках трьох типорозмірів, якими обладнано більшість нафтогазових свердловин в Україні: 180×350-280×350, 180×700-280×700, 156×320-280×210, 156×320-280×350, 180×700-280×700 (CAMERON).

Промислові випробування проводились на діючому газовому полігоні ДП «ЛІКВО» НАК «Нафтогаз України». Під час промислових випробувань визначено стійкість до гідроабра-

живного розмивання трьох конструкцій різаків та трьох видів насадок. Найкращі показники виявлено щодо різача з гнутими трубами та насадки з направляючим конусом.

Тому згідно з отриманими результатами промислових випробувань устаткування для демонтажу пошкодженого обладнання пропонується до використання даний метод застосування різача з гнутими трубами і насадкою з направляючим конусом для ліквідації відкритих нафтогазових фонтанів та інших аварій.

Даний метод має наступні переваги у порівнянні з іншими способами демонтажу пошкодженого обладнання на гирлі фонтануючої свердловини:

- можливість проведення робіт поблизу населених пунктів та інших особливих об'єктів, де відстрілювання обладнання танком недопустиме;

- відрізання проводиться в чітко визначеній ділянці пошкодженого об'єкта (відстрілюванням цього зробити неможливо);

- в процесі різання не пошкоджується обладнання, що залишається на гирлі свердловини;

- процес різання виконується без присутності людей в небезпечній зоні;

- гідроабразивне різання проходить без іскріння, що забезпечує вибухобезпеку при непалаючому фонтані.

### Література

1 Римчук Д. В. Нові технології і механізми для ліквідації відкритих фонтанів / Д. В. Римчук, І. В. Добровольський // Проблеми нафтогазової промисловості: Збірник наукових праць. Випуск 10. – Київ.: ДП «Науканафтогаз», 2012. – С. 260-266.

2 Добровольський І.В. Выбор оптимальных режимов резания металла / И. В. Добровольский, М. М. Лях // Нефть и газ экспозиция. – 2016. – № 4. – С. 58-60.

3 Логанов Ю.Д. Открытые фонтаны и борьба с ними. Справочник / Ю.Д. Логанов, В.В. Соболевский, В.М. Симонов. – М: Недра. 1991. – 189 с.

4 Малеванский В.Д. Открытые газовые фонтаны и борьба с ними / В.Д. Малеванский. – М.: Гостоптехиздат, 1963.- 288 с.

5 Вайсберг Г. Л. Фонтанна безпека. Запитування. Відповіді / Г. Л. Вайсберг, Д. В. Римчук. – Харків: УЦЕБОП, 2002. – 474 с.

6 Казаков Ю.В. Сварка и резка материалов: учебное пособие для начального профессионального образования / Ю.В. Казаков, М.Д. Банов, М.Г. Козулин. – М.: Академия, 2004. – 398 с.

7 Латыпов Р. Р. Некоторые сведения о гидрорезании материалов / Р. Р. Латыпов, Н. Г. Терегулов, А. И. Харлов // Труды Уфимского ГАТУ. – 1999.

8 Полянский, С.Н. Технология и оборудование гидроабразивной резки / С.Н. Полянский, А.С. Нестеров // Вестник машиностроения. 2004. – № 5.

9 Фик І.М. Облаштування газових та нафтових свердловин при експлуатації. Частина друга. Фонтанні арматури / І.М. Фик, Д.В. Римчук, Б.Б. Синюк. – Харків: ТО «Ексклюзив», 2015. – 406 с.

10 Фик І.М. Облаштування газових та нафтових свердловин при експлуатації. Частина перша. Колонні обв'язки / І.М. Фик, Д.В. Римчук. – Харків: ТО «Ексклюзив», 2015. – 299 с.

*Стаття надійшла до редакційної колегії  
05.12.16*

*Рекомендована до друку  
професором Федоришиним Д.Д.  
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)  
канд. техн. наук Римчуком Д.В.  
(ДП «ЛІКВО» НАК «Нафтогаз України»,  
м. Харків)*

## ДОВГОВІЧНІСТЬ ТРУБНИХ КОЛОН ЗА СКЛАДНОГО НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ

*Р.В. Рачкевич, В.І. Слободян, В.М. Івасів, В.І. Артим*

*ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15,  
e-mail: ruslanvr79@gmail.com*

*Метою статті є розроблення методу прогнозування довговічності трубних колон, враховуючи як нормальні, так і дотичні напруження в їх поперечному перерізі. Для розв'язання поставлених задач застосовували методи кінетичної теорії втоми та методи теорії міцності.*

*В результаті досліджень отримано трипараметричне рівняння кривої втоми, одним із аргументів якого є приведена до симетричного циклу навантажування величина еквівалентного напруження асиметричного циклу, що враховує як нормальну, так і дотичну компоненту внутрішніх зусиль у небезпечному перерізі.*

*Розрахунки свідчать, що зростання величини дотичних напружень у поперечному перерізі трубної колони при незмінному рівні нормальних, призводить до суттєвого зменшення довговічності. Так, для бурильних труб умовним діаметром 114 мм за величини нормального напруження 60 МПа втомна довговічність зменшується до дев'яти разів при зростанні дотичного напруження від 0 до 60 МПа. Обчислення, проведені для інших елементів бурильної колони, свідчать, що ця відмінність може сягати двадцяти п'яти разів.*

*Результати розрахунків також засвідчили, що вплив дотичних напружень на втомну довговічність менш відчутний на вищому рівні нормальних напружень. Так, при рівні нормального напруження 135 МПа у вже згаданому типорозмірі бурильних труб за того ж діапазону зміни дотичного напруження спостерігається зменшення довговічності до трьох разів.*

**Ключові слова:** бурильна колона, еквівалентні напруження, довговічність.

*Целью статьи является разработка метода прогнозирования долговечности трубных колонн с учетом как нормальных, так и касательных напряжений в их поперечном сечении. Для решения поставленных задач использовались методы кинетической теории усталости и методы теории прочности.*

*В результате исследований получено трехпараметрическое уравнение кривой усталости, одним из аргументов которого является приведенная к симметричному циклу нагрузки величина эквивалентного напряжения асимметричного цикла, которая учитывает как нормальную, так и касательную компоненту внутренних усилий в опасном сечении.*

*Расчеты показали, что рост величины касательных напряжений в поперечном сечении трубной колонны при неизменном уровне нормальных, приводит к существенному уменьшению долговечности. Например, для бурильных труб условным диаметром 114 мм при величине нормального напряжения 60 МПа усталостная долговечность уменьшается до девяти раз при росте касательного напряжения от 0 до 60 МПа. Вычисления, проведенные для других элементов бурильной колонны, показали, что разница может достигать двадцати пяти раз.*

*Результаты расчетов также показали, что влияние касательных напряжений на усталостную долговечность менее ощутимо на высшем уровне нормальных напряжений. Так, при уровне нормального напряжения 135 МПа в уже упомянутом типоразмере бурильных труб с тем же диапазоном изменения касательного напряжения наблюдается уменьшение долговечности до трех раз.*

**Ключевые слова:** бурильная колонна, эквивалентные напряжения, долговечность.

*The purpose of the article is to develop the method of predicting the pipe strings longevity, taking into account both normal and shear stresses in their cross section. To solve these objectives the methods of kinetic fatigue theory and theory of strength have been applied.*

*In the process of research the three-parameter equality of fatigue curve has been obtained, one parameter of which is a value of the asymmetric cycle equivalent stress resulted in the reversed stress cycle. This value takes into account both normal and shear stress component of internal forces in dangerous section.*

*The calculations have shown that the value increase of shear stresses in the pipe string cross section under the unchangeable level of normal stresses leads to the substantial decrease of longevity. For example, for pipe strings with 114 mm in diameter under the normal stress of 60 MPa, the fatigue life is reduced to 9 times under the growth of shear stress from 0 to 60 MPa. The calculations, conducted for other elements of a pipe string have shown that the difference can reach as high as 25 times.*

*The calculations results have also shown that the influence of shear stresses on the fatigue longevity is not so tangible at higher level of normal stresses. Under the level of normal stress of 135 MPa in the abovementioned standard size of drill strings with the same range of the shear stress change, there is the reduction of longevity to 3 times.*

**Key words:** drill string, equivalent stresses, longevity.

### Вступ

Трубні колони широко використовуються під час спорудження та експлуатації нафтогазових свердловин. За їх допомогою виконується

цілий ряд важливих технологічних операцій при видобуванні вуглеводнів. Наприклад, до функцій бурильної колони можна віднести створення осевого навантаження на породоруйнівний інструмент, передачу крутного мо-

менту від обладнання на усті свердловини до породоруйнівного інструменту при роторному чи комбінованому способах буріння та сприйняття реактивного моменту при бурінні вибійними двигунами і, насамкінець, забезпечення гідравлічного чи електричного каналів зв'язку між обладнанням на усті та вибої свердловини. Окрім цього, існує цілий ряд додаткових завдань, які пов'язані із проведенням протиаварійних та геофізичних робіт.

Прийнявши до уваги зростаючі об'єми будівництва похило-скерованих та горизонтальних свердловин, варто відзначити, що трубні колони під час експлуатації зазнають дії широкого спектру зовнішніх навантажень. Наприклад, в поперечному перерізі бурильних колон виникають нормальні та дотичні напруження, що можуть стати причиною втомного чи корозійно-втомного руйнування. Наслідки таких відмов неминуче пов'язані із значними фінансовими та часовими затратами. Тому проблема дослідження втомної міцності та прогнозування довговічності трубних колон знаходиться в полі зору значної кількості науковців. Розглянемо більш детально деякі напрацювання за даним напрямком.

#### Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень і публікацій

Для встановлення вигляду аналітичної залежності кількості циклів до настання критичного стану чи руйнування від напружень у небезпечному перерізі використовують різноманітні функції. Вони відрізняються за кількістю параметрів та визначаються або експериментальними, або теоретичними методами.

Одним із найбільш поширених методів залишається аналітичний опис кривої втоми залежністю із двома параметрами, які визначаються за результатами втомних випробувань [1 – 5]. Наприклад, щоб описати кінетику корозійно-втомного пошкодження елементів колони насосно-компресорних труб, автор роботи [1] застосував двопараметричне рівняння кривої втоми у вигляді

$$\lg(\sigma_{an}) = b \lg(N) + a, \quad (1)$$

де  $a$  і  $b$  – параметри рівняння, які визначаються за даними корозійно-втомних випробувань;

$\sigma_{an}$  – зведені до симетричного циклу амплітудні напруження асиметричного циклу;

$N$  – довговічність – кількість циклів до руйнування.

Крива втоми, яку було отримано, має вигляд (див. рис. 1).

В науковій праці [4] використано функціональну залежність кількості циклів до руйнування ( $N_k$ ) від нормального напруження ( $\sigma_{alt k}$ ) у степеневому вигляді

$$N_k = C_{SN} (\sigma_{alt k})^{-m_{SN}}, \quad (2)$$

де  $C_{SN}$ ,  $m_{SN}$  – параметри рівняння кривої втоми, отримані для симетричного циклу навантаження.

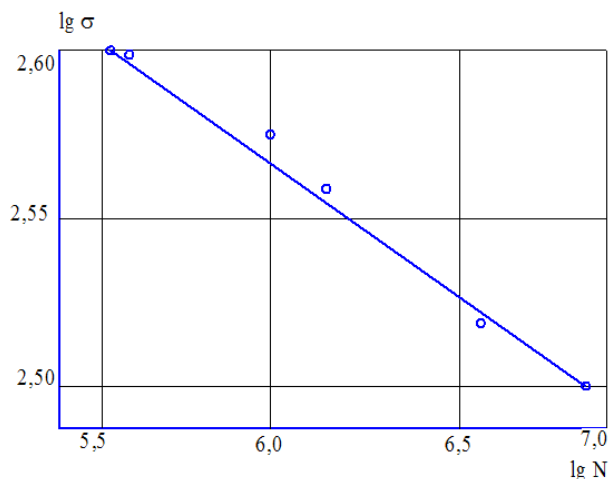


Рисунок 1 – Крива втоми різьбового з'єднання НКТ діаметром 89 мм

В графічному вигляді рівність (2) зображено на рисунку 2.

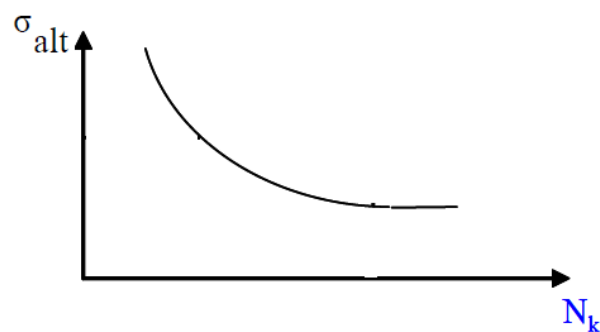


Рисунок 2 – Крива втоми різьбового з'єднання бурильної колони

Формулу, подібну до (1), можна зустріти також у роботах [6, 7]. Тут же, а також у працях [8 – 10], зазначено і про використання трипараметричного рівняння втоми, один із варіантів запису якого має вигляд

$$N = N_0 \ln \left\{ 1 + \left[ \exp \left( \frac{\sigma_{max} - \sigma_{rR}}{V} \right) - 1 \right]^{-1} \right\}, \quad (3)$$

де  $N$  – розрахункова довговічність;

$N_0$  – параметр, який характеризує кількість циклів до точки нижнього перегибу кривої втоми;

$\sigma_{max}$  – максимальне напруження циклу регулярного навантаження з постійним значенням коефіцієнта асиметрії;

$\sigma_{rR}$  – частинне значення границі витривалості, що відповідає певній імовірності неруйнування;

$V$  – параметр з розмірністю напруження.

Графічний вигляд функції (3) для зразків із сталі 40 ХН, що використовується для виготовлення елементів бурильних колон, наводиться в роботі [6] (див. рис. 3).

В науковій праці [11] наводиться формула для визначення кількості циклів до руйнування

$$\lg(N) = a + b_1 \lg(\sigma_r) + b_2 \lg(\sigma_m)^2, \quad (4)$$

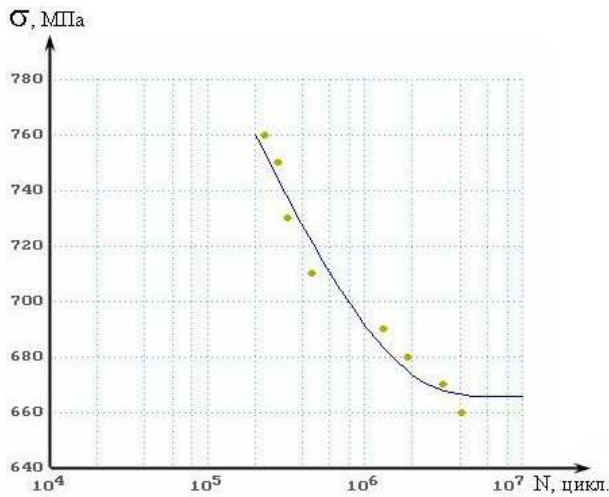


Рисунок 3 – Крива втоми зразків зі сталі 40 ХН за віднульового циклу навантаження

де  $\sigma_r$ ,  $\sigma_m$  – середнє напруження та розмах напружень циклу відповідно;

$a$ ,  $b_1$ ,  $b_2$  – константи, які отримуються за результатами випробувань повнорозмірних зразків буриньних труб.

Криві втоми для буриньних труб із зовнішнім діаметром 114 мм, побудовані за рівністю (4), відображені на рис. 4.

Автором наукового дослідження [6] запропоновано використання чотирьох параметрів для опису кінетики корозійно-втомного руйнування. Суть запропонованого підходу полягає у використанні рівняння (3) для верхньої гілки

кривої корозійної втоми в комбінації з розробленим рівнянням для нижньої гілки, параметром якого є коефіцієнт впливу корозійного чинника за низьких напружень ( $k$ ).

В роботі [12] також наводиться формула для прогнозування циклічної довговічності із чотирма параметрами у такому вигляді

$$\sigma_{\max} \frac{\Delta \varepsilon}{2} = \frac{(\sigma'_f)^2}{E} (2N_f)^{2b} + \sigma'_f \varepsilon'_f (2N_f)^{b+c}, \quad (5)$$

де  $\sigma'_f$ ,  $\varepsilon'_f$ ,  $b$ ,  $c$  – коефіцієнт втомної міцності, коефіцієнт пластичності при втомі, показник втомної міцності та показник пластичності при втомі відповідно.

Як зазначають автори [12], вищезгадані величини називаються циклічними властивостями матеріалу. Графічний вигляд залежності (5) зображено на рис. 5.

Втім, як видно із рівнянь (1) – (5), в наукових працях щодо дослідження втомної міцності буриньних та насосно-компресорних колон, не враховується вплив дотичних напружень на їх довговічність. В деяких роботах, зокрема [13], вказано, що впливом дотичних напружень можна знехтувати. До подібного висновку дійшов автор наукової праці [14]. В результаті експериментальних досліджень втомної міцності гладких зразків матеріалу буриньних труб групи міцності Д зазначено, що постійні напруження кручення не впливають на величину границі витривалості при симетричному циклі навантаження згином.

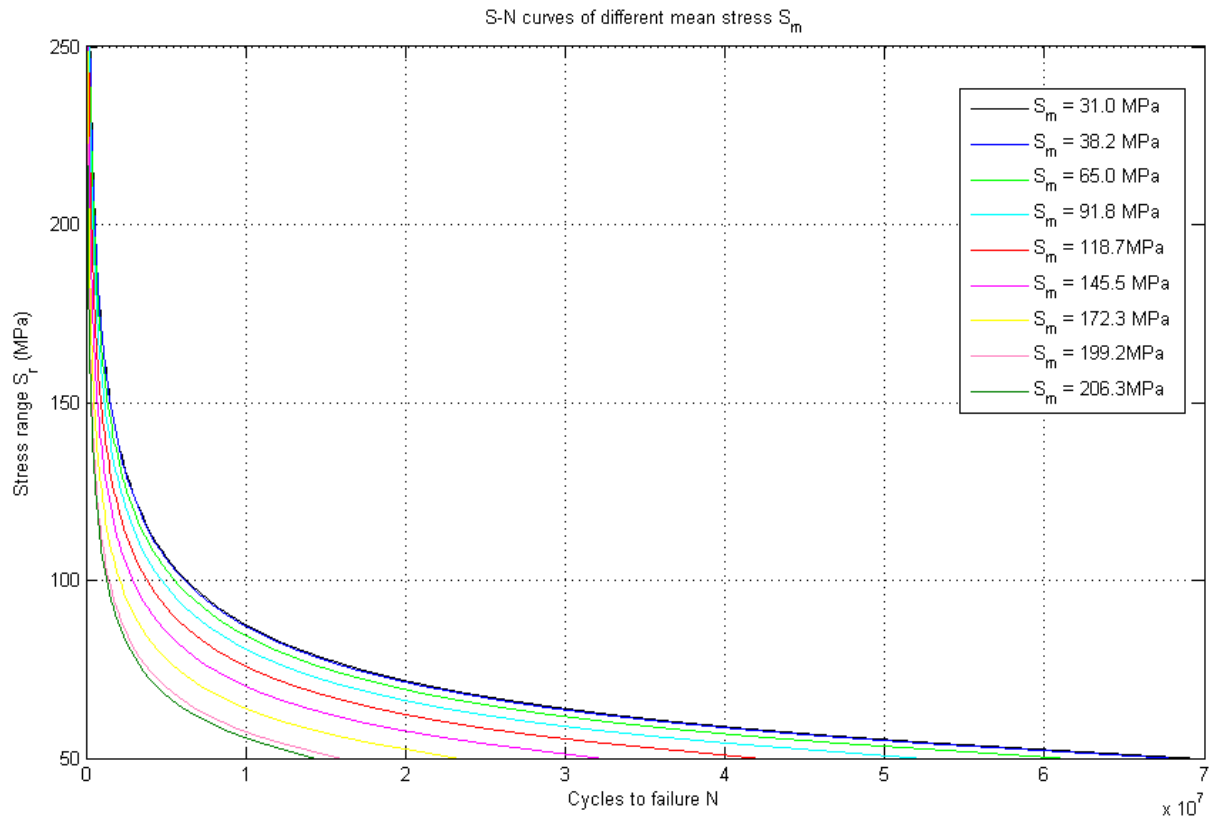


Рисунок 4 – Криві втоми для буриньних труб із зовнішнім діаметром 114 мм за різних режимів навантаження

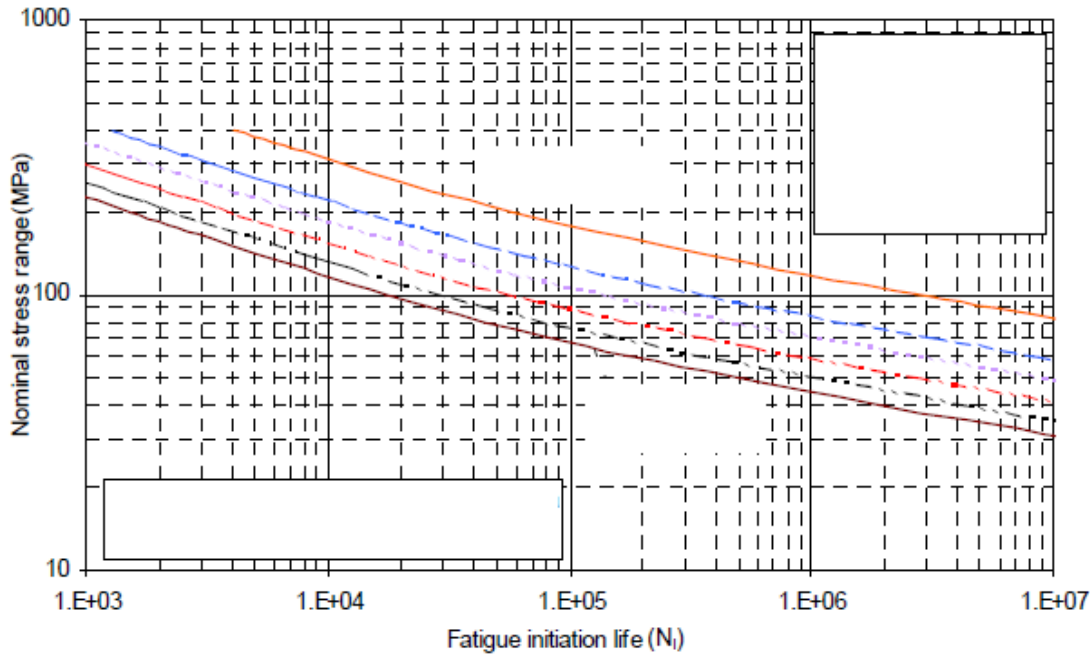


Рисунок 5 – Криві втоми для різьбових з'єднань NC26 за різних режимів навантажування

З іншого боку, в наукових працях, що присвячені загальному дослідженню втоми при дії складного навантаження [15 та ін.] вказується на суттєвий вплив дотичних напружень на довговічність експериментальних зразків. Зокрема, в роботі [8] досліджено циклічну міцність сталей 45 та 40Х в умовах одночасної дії циклічного згину і статичного кручення. При проведенні експериментальних досліджень введено спеціальний коефіцієнт  $\alpha$ , який рівний відношенню величини дотичного напруження в небезпечному перерізі до нормального і приймався рівним 0; 0,25; 0,5; 0,75 та 1,0. В результаті встановлено факт зменшення границі витривалості в залежності від величини співвідношення  $\alpha$ . Додатково зазначено, що причиною цього є збільшення головних напружень в небезпечному перерізі лабораторних зразків. Варто згадати, що сталі 45 та 40Х, окрім іншого, використовуються для виготовлення елементів бурильної колони.

#### Висвітлення невирішених раніше частин загальної проблеми

Проаналізувавши викладений вище матеріал, можемо сказати, що вирішення задач, пов'язаних із досягненням мети даної статті, найбільш повно подано в роботі [8]. Авторами для кожної величини коефіцієнта  $\alpha$  побудовано криву втоми, яка описується трипараметричним рівнянням у вигляді, подібному до (3), де одним із аргументів функції довговічності є нормальне напруження в небезпечному перерізі. Втім, такий підхід не дає можливості прогнозувати довговічність елементів трубних колон при довільній величині відношення дотичного напруження в небезпечному перерізі до нормального. Саме вирішенню вказаної задачі присвячено дану статтю.

#### Цілі статті

Метою даного дослідження є розроблення методу прогнозування довговічності трубних колон з врахуванням як нормальних, так і дотичних напружень. Зокрема, необхідно отримати трипараметричне рівняння кривої втоми, одним із аргументів якого є приведена до симетричного циклу навантажування величина еквівалентного напруження асиметричного циклу, яка враховує як нормальну, так і дотичну компоненту внутрішніх зусиль у небезпечному перерізі.

#### Основний матеріал

Для прогнозування довговічності трубної колони скористаємося *трипараметричним рівнянням втоми*, яке було запропоноване Є.К. Почтенним [9, 10] та використане в роботі [6] стосовно бурильних труб. Як один з аргументів функції довговічності використаємо деяку величину  $\eta_{eqv}$ , яку назовемо *еквівалентним напруженням приведенного до симетричного асиметричного циклу навантажування, враховуючи як нормальні, так і дотичні напруження в поперечному перерізі трубної колони*. Відтак рівняння Є.К. Почтенного набуде вигляду

$$N = N_0 \ln \left\{ 1 + \left[ \exp \left( \frac{\eta_{eqv} - \sigma_{rR}}{V} \right) - 1 \right]^{-1} \right\},$$

де  $N$  – розрахункова довговічність;  
 $N_0$  – параметр, який характеризує кількість циклів до точки нижнього перегину кривої втоми;

$\sigma_{rR}$  – частинне значення границі витривалості, що відповідає певній імовірності неруйнування;

$V$  – параметр з розмірністю напруження.

Величина  $\eta_{eqv}$  може бути визначена на основі формул, що отримані в науковій праці [6]

$$\eta_{eqv} = \eta_{max} \left( 1 - \frac{(1-\psi)(1+R)}{2} \right), \text{ при } R \leq 0,$$

$$\eta_{eqv} = \sigma_{\epsilon} \psi_1 \left( \frac{1+\psi}{1+\psi_1} \right), \text{ при } R > 0,$$

де  $\psi$  – коефіцієнт чутливості до асиметрії циклу навантажування (0,35...0,8);

$\psi_1$  – розрахунковий коефіцієнт, який визначається за формулою [6]

$$\psi_1 = \frac{\eta_{max}(1-R)}{2\sigma_{\epsilon} - \eta_{max}(1+R)},$$

де  $\sigma_{\epsilon}$  – границя міцності матеріалу трубної колони;

$\eta_{max}$  – еквівалентне максимальне напруження циклу експлуатаційного навантаження;

$R$  – коефіцієнт асиметрії циклу навантажування.

Величини  $\eta_{max}$  та  $R$  відповідно можна розрахувати за рівностями

$$\eta_{max} = \eta_m + \eta_a,$$

$$R = \frac{\eta_m - \eta_a}{\eta_{max}},$$

де  $\eta_a$ ,  $\eta_m$  – еквівалентна амплітуда напружень та еквівалентне середнє напруження при складному навантаженні.

Для визначення  $\eta_a$ ,  $\eta_m$  скористаємося так званим *узгальненим критерієм* [15], згідно із яким можна записати такі формули

$$\eta_a = \chi_a \sigma_{ia} + (1 - \chi_a) \sigma_{1a}, \quad (6)$$

$$\eta_m = \chi_m \sigma_{im} + (1 - \chi_m) \sigma_{1m},$$

де  $\chi_a$ ,  $\chi_m$  – безрозмірні коефіцієнти;

$\sigma_{ia}$ ,  $\sigma_{im}$  – інтенсивності амплітуди напружень та середнього напруження;

$\sigma_{1a}$ ,  $\sigma_{1m}$  – головні амплітудні та середні напруження.

Величини  $\chi_a$ ,  $\chi_m$  рівні [15]

$$\chi_a = 1,37 \left( \frac{\sigma_{-1}}{\tau_{-1}} - 1 \right),$$

$$\chi_m = 1,37 \left( \frac{\sigma_p}{\tau_p} - 1 \right),$$

де  $\sigma_{-1}$ ,  $\tau_{-1}$  – відповідно границі втомної міцності при симетричному циклі навантаження матеріалу трубної колони;

$\sigma_p$ ,  $\tau_p$  – відповідно границі міцності при розтязі матеріалу трубної колони.

Як зазначено в роботі [15], допускається прийняти

$$\frac{\sigma_{-1}}{\tau_{-1}} \approx \frac{\sigma_p}{\tau_p},$$

отже,  $\chi_a \approx \chi_m$ . Це суттєво зменшує кількість необхідних експериментальних досліджень.

Загалом рівність для визначення інтенсивності напружень має вигляд [15]

$$\sigma_i = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2},$$

де  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$  – головні напруження, що діють на поверхнях елемента.

Для визначення величин  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$  розглянемо ділянку трубної колони 1, на яку діє осьова сила  $F$ , згинальний  $M$  та крутний  $T$  моменти (див. рис. 6 а). Великою внутрішнього тиску від дії промивальної рідини знехтуємо. Виділимо із цієї ділянки елемент 2, на гранях якого будуть діяти напруження, вказані на рис. 6 б).

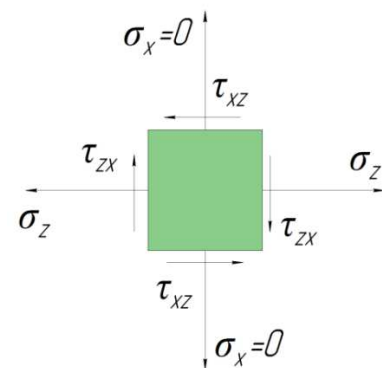
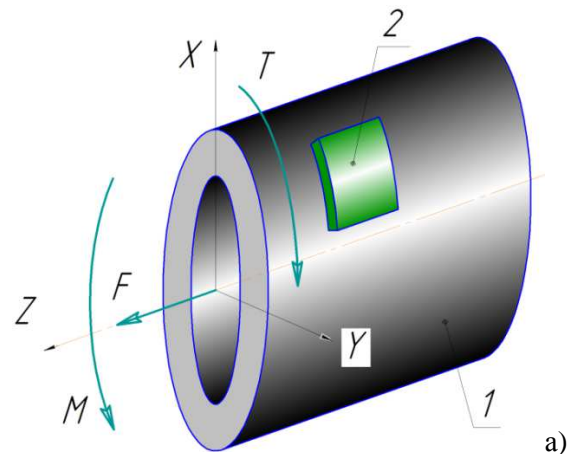


Рисунок 6 – Напружений стан елемента стінки трубної колони

В даному випадку елемент зазнає плоского напружено-деформованого стану, відтак головне напруження  $\sigma_2$  приймемо рівним нулю. Два інші можна визначити за формулою [15]:

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_x + \sigma_z}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_z)^2 + 4\tau_{xz}^2}, \quad (7)$$

$$\sigma_3 = \frac{\sigma_x + \sigma_z}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_z)^2 + 4\tau_{xz}^2}. \quad (8)$$

Оскільки не враховується внутрішній тиск промивальної рідини, напруження  $\sigma_x$  дорівнюватиме нулю. Відтак рівності (7) та (8) можна записати у вигляді

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_z}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{\sigma_z^2 + 4\tau_{xz}^2},$$

$$\sigma_3 = \frac{\sigma_z}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{\sigma_z^2 + 4\tau_{xz}^2}.$$

Величина  $\sigma_z$  визначається в залежності від того, яке еквівалентне напруження слід обчислити. Якщо проводиться розрахунок еквівалентної амплітуди за формулою (6), то

$$\sigma_z = \sigma_{3z} = \frac{M r}{I},$$

де  $\sigma_{3z}$  – нормальне напруження в поперечному перерізі трубної колони від згину;

$M$  – згинальний момент в поперечному перерізі трубної колони;

$r$  – радіус трубної колони;

$I$  – момент інерції навколо однієї із головних осей поперечного перерізу.

Для визначення середнього еквівалентного напруження формула для  $\sigma_z$  набуде вигляду:

$$\sigma_z = \sigma_p = \frac{Q}{A},$$

де  $\sigma_p$  – нормальне напруження в поперечному перерізі трубної колони від розтягу;

$Q$  – осьова сила розтягу;

$A$  – площа поперечного перерізу трубної колони.

Дотичне напруження  $\tau_{xz}$  згідно із законом парності дотичних напружень [15] рівне  $\tau_{zx}$ , а отже, може бути визначене за залежністю

$$\tau_{xz} = \tau_{zx} = \frac{T r}{I_p},$$

де  $T$  – крутний момент, що діє на трубку колону;

$I_p$  – полярний момент інерції поперечного перерізу трубної колони.

Використовуючи розроблений метод, було проаналізовано вплив дотичних напружень у поперечному перерізі елементів бурильної колони на їх довговічність. Вихідні дані для розрахунку відображено в таблиці 1 [7].

Нормальні напруження в досліджуваному поперечному перерізі трубної колони від розтягу визначалися за відстані від останнього до нейтрального перерізу, рівної 1500 м, що є характерним для свердловин прикарпатського регіону. Мінімальні нормальні напруження згину задавалися з умови перевищення діючим еквівалентним напруженням середнього значення границі витривалості для відповідного елемента бурильної колони. Максимальні дотичні напруження визначали, виходячи із величини крутного моменту 10 кНм. Вибір такого значення обумовлений істотними величинами моментів опору, які виникають при обертанні долота та бурильної колони у похило-скерованих та горизонтальних свердловинах. Остаточні результати розрахунків подано у таблицях 2–4.

В графічній інтерпретації результати таблиць 2–4 матимуть вигляд, представлений на рис. 7.

## Висновки

Як бачимо з таблиць 2–4, зростання нормального напруження від мінімальної до максимальної величини без врахування впливу дотичного знижує довговічність проаналізованих елементів бурильної колони: ТБВ 114×10Д – у 9 разів; ТБВ 140×11Л – у 166 разів; 3-121 бурильного замка ЗШ-146 – утричі. За максимальної величини дотичного напруження вказані величини будуть відповідно рівними 3, 24 та 2.

З іншого боку, за мінімальної величини нормального напруження зростання дотичної складової від мінімуму до максимуму призводить до такого зменшення довговічності: для різьби ТБВ 114×10Д – у 9 разів, різьби ТБВ 140×11Л – у 25 разів, замкової різьби 3-121 – удвічі. За максимальної величини нормального напруження вплив дотичної складової на величину довговічності стає дещо меншим. Для різьби ТБВ 114×10Д отримано відмінність у 3 рази, різьби ТБВ 140×11Л – у 4 рази, замкової різьби 3-121 – менше, ніж удвічі.

З викладеного вище бачимо, що дотичні напруження суттєво зменшують довговічність елементів бурильної колони. Так, проведений розрахунок свідчить, що за фіксованої амплітуди нормальних напружень довговічність елементів бурильної колони, обчислена без врахування дотичних та із їх врахуванням, може відрізнятись від 2 до 25 разів. Отримані результати також свідчать, що взаємовплив нормальної та дотичної складової напруження на довговічність є більш відчутним на низьких рівнях напружень, які більш часто зустрічаються в експлуатаційних умовах.

Особливістю запропонованого методу є те, що для прогнозування довговічності певного елемента трубної колони за складного напруженого стану достатньо мати параметри кривої втоми, отримані за результатами випробувань при дії в небезпечному перерізі тільки нормальних напружень. Дотичну компоненту враховують шляхом використання як одного із аргументів рівняння кривої втоми еквівалентного напруження, отриманого згідно із узагальненим критерієм міцності. Так, наприклад, при максимальному нормальному напруженні циклу 235 МПа і відсутності дотичного еквівалентного напруження дорівнюватиме також 235 МПа. Якщо ж згадані напруження становитимуть 235 і 60 МПа відповідно, величина еквівалентного збільшиться на 25 % і дорівнюватиме 312 МПа.

Таблиця 1 – Характеристики втомної міцності елементів бурильної колони

Типи елементів бур. колони (середовище)	Середнє значення границі витривалості $\sigma_{rR}$ , МПа	Кут нахилу кривої V, МПа	Базове число циклів $N_0$	Границя міцності $\sigma_e$ , МПа
ТБВ114x10Д (бур. розчин)	81,77	58,6	$4,6 \cdot 10^5$	637
ТБВ140x11Л	53,87	20,78	$1,01 \cdot 10^7$	784
3-121 (повітря)	112,7	267	$4,2 \cdot 10^5$	980

Таблиця 2 – Результати розрахунку довговічності різьбового з'єднання ТБВ 114x10Д (ГОСТ 631-75) при двовісному напруженому стані

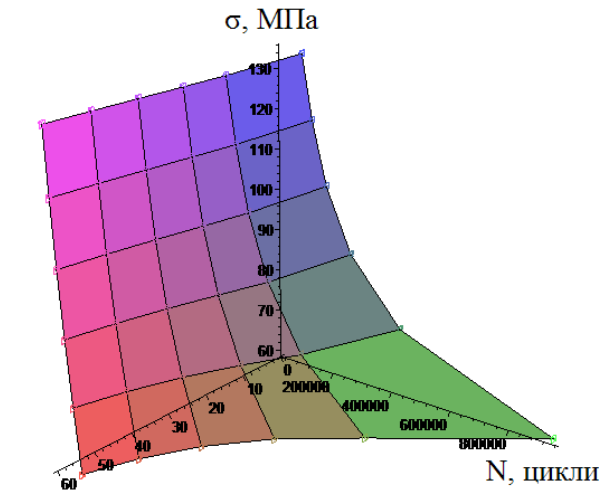
Величина дотичних напружень $\tau$ , МПа	Величина нормальних напружень $\sigma$ , МПа					
	$\sigma = 60$	$\sigma = 75$	$\sigma = 90$	$\sigma = 105$	$\sigma = 120$	$\sigma = 135$
$\tau = 0$	954723	451482	278587	191090	140479	104796
$\tau = 20$	556944	340833	228294	162918	122295	92586
$\tau = 30$	371127	256982	183449	135760	104049	79999
$\tau = 40$	246959	185955	140368	107727	84442	66076
$\tau = 50$	165266	131749	104023	82482	66068	52628
$\tau = 60$	111202	92282	75484	61544	50271	40728

Таблиця 3 – Результати розрахунку довговічності різьбового з'єднання ТБВ 140x11Л (ГОСТ 631-75) при двовісному напруженому стані

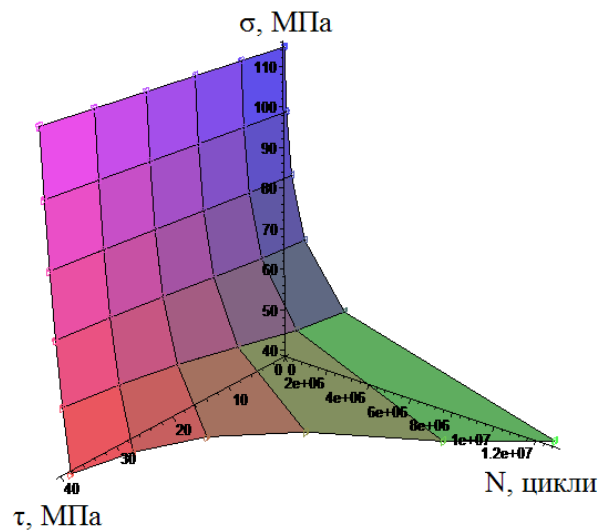
Величина дотичних напружень $\tau$ , МПа	Величина нормальних напружень $\sigma$ , МПа					
	$\sigma = 40$	$\sigma = 55$	$\sigma = 70$	$\sigma = 85$	$\sigma = 100$	$\sigma = 115$
$\tau = 0$	12926564	3070944	1054387	401060	161324	78058
$\tau = 8$	9654194	2687792	959389	372076	151476	73737
$\tau = 16$	5164373	1866749	732070	298988	125859	62330
$\tau = 24$	2481662	1102915	483028	211558	93475	47506
$\tau = 32$	1140606	587053	285112	134617	62924	33002
$\tau = 40$	510205	291839	154933	78648	38975	21153

Таблиця 4 – Результати розрахунку довговічності замкової різьби 3-121 бурильного замка ЗШ-146 (ГОСТ 5286-75) при двовісному напруженому стані

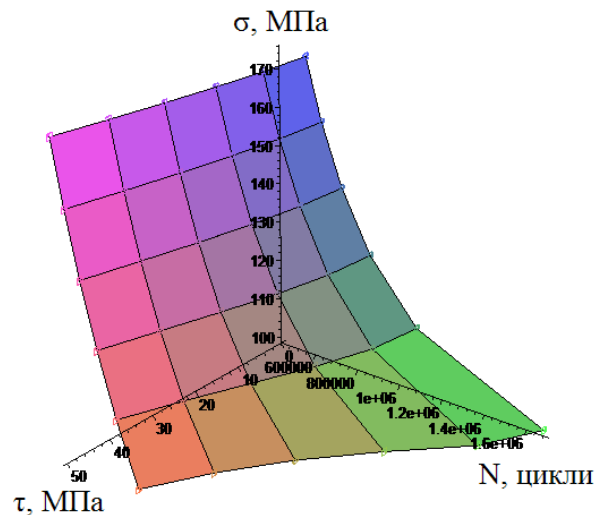
Величина дотичних напружень $\tau$ , МПа	Величина нормальних напружень $\sigma$ , МПа					
	$\sigma = 100$	$\sigma = 115$	$\sigma = 130$	$\sigma = 145$	$\sigma = 160$	$\sigma = 175$
$\tau = 0$	1683014	1106097	881750	743072	644060	567995
$\tau = 10$	1550451	1073823	865107	732540	636691	562515
$\tau = 20$	1309288	992622	820336	703383	615965	546951
$\tau = 30$	1094124	891505	758821	661387	585291	523514
$\tau = 40$	923433	790702	691302	612791	548611	494864
$\tau = 50$	789163	698965	624740	562430	509299	463420



а)



б)



в)

а) ТБВ 114×10Д (ГОСТ 631-75);

б) ТБВ 140×11Л (ГОСТ 631-75);

в) 3-121 бурильного замка ЗШ-146 (ГОСТ 5286-75)

**Рисунок 7 – Поверхні втоми елементів бурильної колони, отримані з врахуванням величини нормальних та дотичних напружень у небезпечному перерізі**

1 Васишин В.Я. Підвищення працездатності різьбових з'єднань труб нафтового сортаменту: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.05.12 «Машини нафтової та газової промисловості» / Васишин Віталій Ярославович; Івано-Франків. нац. техн. ун-т нафти і газу, 2013. – 20 с.

2 Vaisberg O. Fatigue of drillstring: state of the art / O. Vaisberg, O. Vincke, G. Perrin etc. // Oil & Gas Science and Technology. – 2002. – No 1 (Vol. 57). – pp. 7 – 37.

3 Veidt M. Design and application of a drill pipe fatigue test facility / M. Veidt, A. Berezovski // SIF2004 Structural Integrity and Fracture (26 – 29 September), Brisbane. – 2004. – pp. 367–375.

4 Vincke O. A new drillstring fatigue supervision system / O. Vincke, D. Averbuch, S. Tollet etc. // SPE / IADC Drilling conference (20–22 February), Amsterdam. – 2007. – pp. 1–8.

5 Braun M. Fatigue assessment of threaded riser connections / M. Braun. – Norwegian University of Science and Technology, 2014. – 78 p.

6 Артим В.І. Підвищення експлуатаційної надійності трубних і штангових колон для буріння та видобування нафти та газу. Рукопис: Автореферат дис. на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.05.12 – машини нафтової і газової промисловості. – Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ, 2010. – 36 с.

7 Механіка руйнування і міцність матеріалів: довідн. посібник / Під заг. ред. В. В. Панасюка. – К.: Наук. думка, 1988. – Т. 10: Міцність та довговічність нафтогазового обладнання / Під ред. В. І. Похмурського, Є. І. Крижанівського. – Львів-Івано-Франківськ: Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України; Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, 2006. – 1193 с.

8 Почтенный Е.К. Исследование циклической прочности сталей 45 и 40Х в условиях совместного действия циклического изгиба и статического кручения / Е.К. Почтенный, Е.С. Стайченко // Проблемы прочности. – 1973. – № 8. – С. 114 – 116.

9 Почтенный Е.К. Кинетическая теория механической усталости и ее приложение / Е.К. Почтенный. – Минск: Наука и техника, 1973. – 216 с.

10 Почтенный Е.К. Прогнозирование долговечности и диагностика усталости деталей / Е.К. Почтенный. – Минск: Наука и техника, 1983. – 246 с.

11 Jiahao Zheng. Fatigue estimation of drill-string and drill-pipe threaded connection subjected to random loading / Zheng Jiahap. – Newfoundland: Memorial University of Newfoundland, 2015. – 125 p.

12 Sungkon H. Fatigue analysis of drillstring threaded connections / H. Sungkon, M. Knight, F.P. Brennan etc // Proceedings of the thirteenth International Offshore and Polar Engineering Conference (25 – 30 May), Honolulu. – 2003. – pp. 202 – 208.

13 Янтурин А.Ш., Осин Г.С., Подалов Ю.А., Папировский В.Л. Некоторые вопросы аварийности бурильных труб // Э.И. Машины и нефтяное оборудование, – М., 1984. – Вып.10. – С. 12-15.

14 Земсков Г.В. О пределе выносливости материала бурильных труб группы прочности Д при сложном нагружении / Г.В. Земсков // Нефтяное хозяйство. – 1972. - № 7. – С. 9 – 11.

15 Писаренко Г.С. Деформирование и прочность материалов при сложном напряженном состоянии / Г.С. Писаренко, А.А. Лебедев. – К.: Наукова думка, 1976. – 416 с.; ил.

*Стаття надійшла до редакційної колегії*

*30.11.16*

*Рекомендована до друку*

*професором Карнашем М.О.*

*(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)*

*професором Майстренком А.Л.*

*(Інститут надтвердих матеріалів*

*ім. В. М. Бакуля НАН України, м. Київ)*

# Дослідження та методи аналізу

УДК 622.243.272

## БІОПОЛІМЕР-СИЛІКАТНИЙ БУРОВИЙ РОЗЧИН ДЛЯ БУРІННЯ ГОРИЗОНТАЛЬНИХ СВЕРДЛОВИН

І.І. Чудик, В.В. Богославець, І.Ф. Дудич

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 727137,  
e-mail: chudoman@ukr.net

Розглядається питання підвищення техніко-економічних показників буріння горизонтальних свердловин за рахунок вибору типу та оптимальної рецептури бурового розчину. Для якісного очищення горизонтальної ділянки стовбура свердловини запропоновано використання біополімер-силікатного бурового розчину. Проаналізовано основні проблеми промивання горизонтальної частини свердловин та бурові розчини, які застосовуються на родовищах України для вирішення цих проблем. За методом латинських планів експерименту за допомогою програми «Експериментатор» було здійснено вибір рецептури біополімер-силікатного бурового розчину і після проведених досліджень властивостей отримано оптимальну рецептуру розчину. Для побудови моделей залежно від діапазонів концентрації реагентів були використані повний факторний експеримент, дробово-факторний експеримент і центральні композиційні плани. Дані ротаційної віскозиметрії оброблялись у пакетному режимі із використанням програми «Rheometry». Встановлено, що найбільш адекватною для плану експерименту є модель Гершеля-Балклі. За результатами отриманих даних встановлено поліноміальні залежності впливу концентрацій деяких хімічних реагентів на реологічні властивості біополімер-силікатного бурового розчину. Встановлено, що використання силікату натрію як наповнювача у біополімер-силікатному розчині дозволяє підвищити стійкість стінок горизонтальної ділянки свердловини та покращити її очищення.

Ключові слова: біополімер-силікатний буровий розчин, оптимальна композиція, очищення свердловини, реологічні властивості.

Рассматривается вопрос повышения технико-экономических показателей бурения горизонтальных скважин за счет выбора типа и оптимальной рецептуры бурового раствора. Для качественной очистки горизонтального участка ствола скважины предложено использование биополимер-силикатного бурового раствора. Проанализированы основные проблемы промывки горизонтальной части скважин и буровые растворы, которые применяются на месторождениях Украины для решения этих проблем. По методу латинских планов эксперимента с помощью программы «Экспериментатор» был осуществлен выбор рецептуры биополимер-силикатного бурового раствора и после проведенных исследований свойств получено оптимальную рецептуру раствора. Для построения моделей в зависимости от диапазонов концентрации реагентов были использованы полный факторный эксперимент, дробно факторный эксперимент и центральные композиционные планы. Обработка данных ротационной вискозиметрии выполнялась в пакетном режиме с использованием программы «Rheometry» и установлено, что наиболее адекватной для плана эксперимента является модель Гершеля-Балкли. По результатам полученных данных установлены полиномиальные зависимости влияния концентраций некоторых химических реагентов на реологические свойства биополимер-силикатного бурового раствора. Установлено, что силикат натрия в качестве наполнителя в биополимер-силикатном растворе позволяет повысить устойчивость стенок горизонтального участка скважины и улучшает ее очистку в целом.

Ключевые слова: биополимер-силикатный буровой раствор, оптимальная композиция, очистка скважины, реологические свойства.

The article deals with the increasing the technical and economical indexes of the horizontal wells drilling as a result of choosing the proper type and optimal drilling mud composition. The use of biopolymer silicate drilling mud is proposed to clean up the wellbore horizontal area. The main problems of wellbore horizontal area washout and drilling muds that are used at oil and gas fields of Ukraine have been analyzed. The biopolymer silicate drilling mud composition has been selected by means of the method of experiment Latin plans of the Experimentator

*Program. The optimal drilling mud composition has been obtained after the conducted research of its properties. To build the designs based on range of agents' concentration, the full factorial experiment, fractional factorial experiment and central composite design have been applied. The data processing of rotational viscometry has been carried out in the batch mode with using the Rheometry program. It has been defined that the most appropriate for the experiment plan is the Herschel-Buckley model. Due to the results of obtained data, polynomial concentration influence dependences of some chemical agents on the biopolymer silicate mud flow characteristics have been established. It has been discovered that the sodium silicate acting as filler in the biopolymer silicate mud allows increasing the strength of the horizontal area walls and improves its cleaning.*

Key words: biopolymer silicate drilling mud, optimal formula, well clean-up, flow characteristics.

**Вступ.** Збільшення обсягів видобутку нафти і газу невід'ємно пов'язане з використанням горизонтальних свердловин. Техніко-технологічному забезпеченню процесу їх спорудження присвячено багато досліджень вітчизняних та зарубіжних вчених, зокрема Алієва М.А., Булатова А.І., Васька І.А., Григоряна А.М., Кунцяка Я.В., Крилова В.І., Калініна А.Г., Коцкулича Я.С., Мислюка М.А., Чернова Б.О., Чудика І.І., Ясова В.Г. та ін. Проте зі зміною гірничо-геологічних умов необхідно весь час адаптовувати техніко-технологічне забезпечення основних процесів спорудження свердловин, використовуючи нові науково-практичні підходи і рішення, які потрібно розробляти.

Закінчування горизонтальної свердловини обумовлюється максимальними показниками зі збереження природної проникності продуктивних пластів, що підвищує ефективність видобутку вуглеводнів. Це вимагає комплексного підходу для їх досягнення. У цьому плані особливе значення має вибір складу і обґрунтування властивостей бурового розчину, що використовується при розкритті продуктивного горизонту. У методиках [1-3] вибір бурового розчину для розкриття продуктивних пластів поєднуються вимоги до складу і його властивостей. При цьому ставляться певні умови і технологічні обмеження. Зокрема, густина бурового розчину, яка повинна бути мінімальною і відповідати умовам буріння на рівновазі або заданій депресії. Фільтрація в пластових умовах повинна бути мінімальною, а склад фільтрату бурового розчину в разі його проникнення в пласт не повинен сприяти фізичним, хімічним та фізико-хімічним явищам, що зменшують проникність привибійної зони пласта (набухання глинистих частинок, освітлення високов'язких емульсій та нерозчинного осаду, підвищення гідрофільності породи і т.п.). Ступінь мінералізації і складу солей фільтрату бурового розчину повинні бути близькими до пластових. Міжфазовий натяг на межі розділу фаз «фільтрат – нафта» також має бути мінімальним.

**Аналіз закордонних і вітчизняних бурових розчинів для буріння горизонтальних свердловин.** При бурінні горизонтальних свердловин значна частина бурильної колони лежить на нижній стінці в стволі, який перетинає продуктивний горизонт. При цьому виникає загроза не тільки погіршення її осевого переміщення по стволу, а і зростають ризики прихоплення. Для їх запобігання особливе значення має буровий розчин і його параметри, правильний вибір яких дозволяє зменшити перепад

тиску між свердловиною і пластом, обмежити фільтрацію промивальної рідини в нього, не допустити утворення липкої фільтраційної кірки і прилипання колони труб до неї тощо. На сьогодні для забезпечення високоякісних показників розкриття продуктивних горизонтів та недопущення вищезгаданих проблем з бурильною колоною в практиці буріння свердловин найчастіше застосовуються такі бурові розчини.

1. *Гуматно-акрилокалієвий буровий розчин і комплексний гуматно-калієвий реагент (ГКР) для його приготування розроблено в УкрНДІгаз [4].* Відомо, що гумати калію з акриловими полімерами утворюють синергетичну суміш, що дає можливість зменшувати витрати полімерів. Всі рецептури гуматно-акрилокалієвого бурового розчину мають низький вміст бентонітової глини (2–4 мас.%). За базову концентрацію ГКР в розчині обрано 5 мас.%, що достатньо для зниження показника фільтрації і забезпечення мінімального рівня іонів калію. Концентрацію полімерів залежно від їх типу змінювали від 0,2 мас. % гіпанолу (на суху речовину) до 0,025 мас. % «Polyplus» (частково гідролізованого поліакриламиду).

2. *Гуматно-біополімерний буровий розчин розроблений в УкрНДІгаз на основі реагентів вітчизняного виробництва [4-6].* Встановлено, що спільне розчинення у воді розгалужених високомолекулярних біополімерів та лінійних полімерів з макромолекулами гуматів призводить до утворення синергетичних композицій, які надають безглинистим буровим розчинам високих структурно-реологічних властивостей та стійкості до дії вибійних температур, лугів і солей полівалентних металів. Впровадження ГББР під час буріння глибоких свердловин №57 Східно-Полтавського ГКР, №502 Хрещенського ГКР, №100 Римарівського ГКР, №26 і №28 Кобзівського ГКР у складних гірничо-геологічних умовах забезпечило високий економічний ефект [4].

3. *Полімеркалієві бурові розчини широко використовуються для розкриття продуктивних пластів на родовищах ПАТ «Укрнафта» і ПАТ «Укргазвидобування».* На родовищах ПАТ «Укрнафта» в останні роки застосовують полімеркалієвий буровий розчин на основі поліакрилатів і на основі Полігум К1. Характерною особливістю полімерних бурових розчинів є присутність у ньому полімерного реагенту-флокулянта, який призначений для флокуляції вибуреної породи. Полімеркалієві розчини запобігають диспергуванню шлама, уповільнюючи при цьому утворення глинистого бурового

розчину шляхом самозамішування. Наприклад, рецептура полімеркалієвого бурового розчину для буріння свердловини 105 Східні Решетняки містила такі матеріали і реагенти: бентонітовий глино порошок, ЛМК-СТ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{KCl}$ ,  $\text{NaOH}$ , КМЦ, лігноксин, полігум-К1, графіт, нафту, сульфонол, СБР, савенол.

4. *Біополімерний буровий розчин «Flo-Pro»* розроблено компанією «M-I SWACO» [4]. Система «Flo-Pro», на відміну від глинистого бурового розчину, не містила глинистої фази, максимально захищає ПЗП, підвищує продуктивність свердловини у 2–3 рази. Основними компонентами системи «Flo-Pro» є реагенти полісахаридного походження – похідні целюлози і крохмалю, а як кольматант в них використовують карбонатний наповнювач – крейду або мармурову крихту спеціально підбраного розміру. Основним недоліком такої системи є висока вартість та нестійкість до високої концентрації іонів полівалентних металів.

У жовтні 2004 року було успішно завершено буріння і кріплення горизонтальної свердловини 152 Яблунівського НГКР, мета якої – збільшення видобутку високов'язкої нафти з продуктивного пласта Б-6. Ця свердловина стала найглибшою горизонтальною свердловиною в Україні, з якої отримано приплив нафти дебітом  $160 \text{ м}^3/\text{добу}$ . Середній добовий дебіт вертикальних і похило-скерованих свердловин з тих, що пробурені раніше на цьому родовищі, склав  $8\text{--}10 \text{ м}^3$ . Завдяки високому інгібуючому і оптимальним структурно-реологічним властивостям розчин «Flo-Pro NT» забезпечив буріння горизонтальної ділянки стовбура свердловини без ускладнень за 23 доби.

5. В роботі [7] запропоновано *безглинистий буровий розчин «Біокар»*, який характеризується псевдопластичними властивостями, наявністю тиксотропної структури і відсутністю у своєму складі активного глинистого компоненту. Склад бурового розчину, мас. %: біокаркомпауд,  $\text{KCl}$ , бактерицид, РПС, нафта, графіт, карбонатний наповнювач, органічний наповнювач. Буровий розчин Біокар успішно випробуваний на свердловинах №33 Східно-Рогінецьська та №306 Лесяківська. Перед розкриттям продуктивних горизонтів у розчин вводили наповнювач для створення кольматацийного бар'єру на поверхні колекторів з метою їх захисту від забруднення.

6. В роботах [5, 6] пропонують використовувати *безглинистий подвійно-інгібуючий буровий розчин* з торговою маркою «Boremax», який в 2005 році удостоєний престижної нагороди «Harta» за видатні досягнення в області розвідки і розробки родовищ. Його було розроблено фахівцями фірми «Varoid» (відділення компанії «Haliburton»). Згідно патенту полімерну основу розчину складають НПАА з молекулярною масою від  $500\ 000$  до  $2 \cdot 10^6$  (вміст 1–2 мас. %) та НПАА з молекулярною масою від  $4 \cdot 10^6$  до  $15 \cdot 10^6$  (вміст до 0,5 мас. %), а також довголанцюгові поліспирти та/або поліаніонна целюлоза з молекулярною масою від 200 до 500 (вміст 1–2 мас. %). У буровому розчині рН регулюється

у межах 8,5–10,0. Під час реалізації бурового розчину «Boremax» до цієї основи можуть додаватися допоміжні реагенти (обважнювачі, згущувачі та реагенти для пониження фільтрації). Буровий розчин «Boremax» має високий рівень інгібуння та високу термостійкість.

7. В роботі [8] для якісного розкриття продуктивних пластів з низькими пластовими тисками пропонують рецептуру *безглинистого крохмально-калієвого бурового розчину*, який сприяє підвищенню структурно механічних властивостей з одночасним зниженням фільтрації та надійному інгібунню глинистих відкладів у продуктивному горизонті. Складовими компонентами цього бурового розчину є концентрований водний розчин екструзивного крохмалю, хлористий калій, гідроксид калію і вода. Характерною особливістю безглинистого крохмально-калієвого бурового розчину є відсутність глинистої фази у розчині, високі інгібуючі властивості, низька фільтрація, що дає змогу звести до мінімуму кольматацию продуктивного горизонту і одночасно зберегти його первинну проникність.

8. *Хлоркалієвий буровий розчин* готується з вмістом глини не більше 4% та містить  $\text{KCl}$  (3–5%), лігносульфонатний реагент і частково гідролізований поліакриламід (20–40%), який підвищує термостабільність бурового розчину [4]. Як понижувачі фільтрації використовується весь спектр вітчизняних реагентів. Такий буровий розчин можна за необхідністю обважнювати до потрібної густини. Іноді для підвищення інгібуючих властивостей в такий буровий розчин додають 0,01–0,02% гідроксиду кальцію або силікат натрію чи калію у кількості 1–2%, який за рахунок проникнення в тріщини і виділення гелю полікремнієвої кислоти цементує поверхню глинистих сланців. Недоліком хлоркалієвого бурового розчину є його загущення при розбурюванні зволожених та легкодиспергуючих глин, наявність у складі бентонітової глини негативно впливає на якість розкриття продуктивних пластів.

Оскільки наведені системи промивання здебільшого вирішують локальні питання процесу їх буріння свердловин і мають певні недоліки з комплексною дією **метою роботи** є розроблення оптимальної рецептури бурового розчину для підвищення якості поглиблення і розкриття продуктивних пластів їх горизонтальних інтервалів.

Для реалізації поставленої мети сформовано такі **задачі дослідження**:

1) визначення можливості використання біополімерних бурових розчинів для якісного буріння горизонтальних свердловин;

2) розроблення оптимальної рецептури біополімер-силікатного бурового розчину для якісної очистки горизонтальної ділянки ствола свердловини.

**Основний матеріал.** Для вирішення проблем якісного промивання горизонтальних свердловин пропонується безглинистий біополімер-силікатний буровий розчин, який є колоїд-

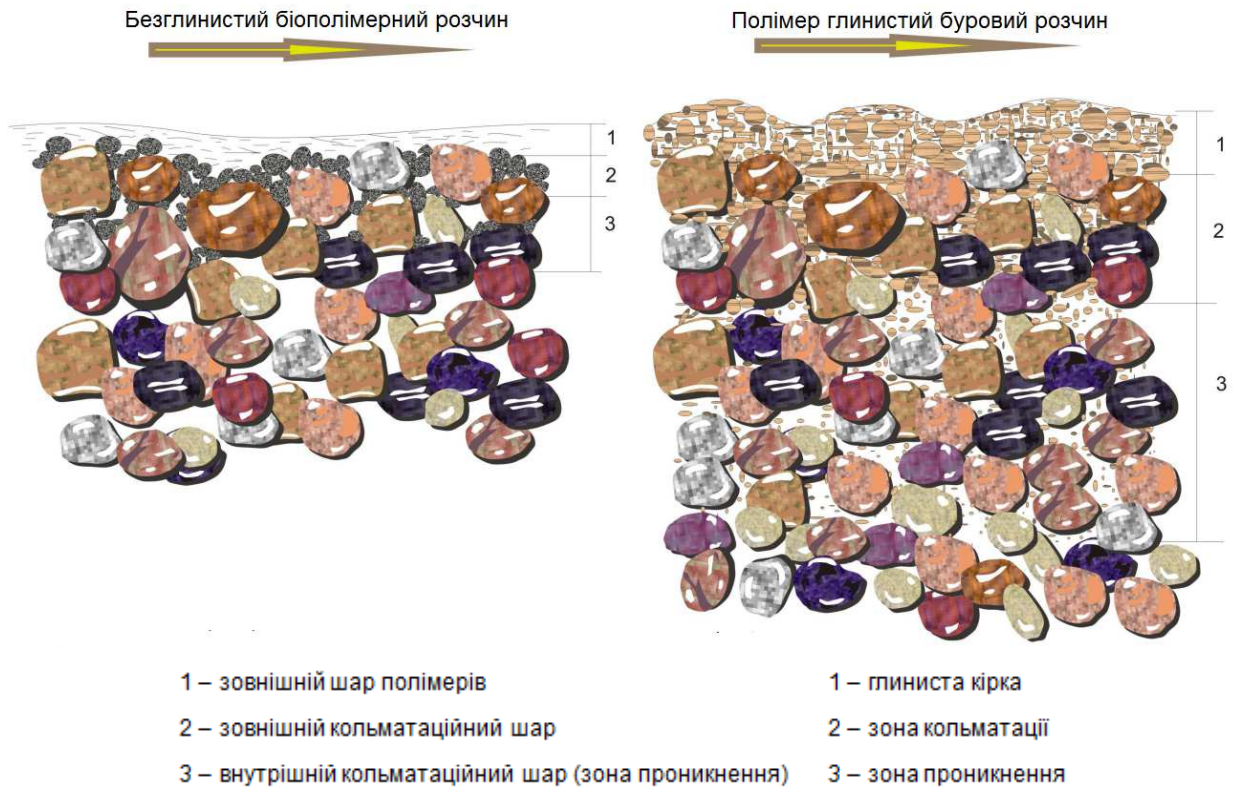


Рисунок 1 – Порівняльна схема проникності промивальних рідин в колектор [13]

ним розчином високомолекулярних розгалужених полімерів класу полісахаридів. Він характеризується яскраво вираженими псевдопластичними властивостями, наявністю тиксотропної структури і відсутністю серед складників активного глинистого компонента. Йому властиві високі характеристики винесення, низька фільтрація та миттєві значення показника статичної напружки зсуву.

Характеристики течії біополімерної рідини суттєво залежать від швидкості зсуву [14]. При малих швидкостях, які відповідають умовам течії рідини у затрубному просторі, реологічні властивості характеризуються аномально високими значеннями. При великих швидкостях зсуву, що відповідають течії у трубах, її реологічні властивості є аномально низькими – близькими до в'язкості води. Внаслідок цього забезпечується ефективно очищення вибою, а гідравлічне тертя та робочі тиски при бурінні залишаються на значно нижчому рівні, ніж при застосуванні полімер-глинистих промивальних рідин.

Важливим фактором недопущення ускладнень та забезпечення високої якості розкриття пластів є обмеження фільтрації через пористе середовище гірських порід. При застосуванні безглинистих промивальних рідин це досягається завдяки застосуванню спеціальних реагентів-блокаторів, розмір часток яких підбирається відповідно до розмірів пор колектора (рисунок 1).

Розглянемо особливості вибору рецептури бурового розчину для буріння горизонтальної ділянки свердловини. У загальному випадку

процедура формалізована у вигляді [9], на першому етапі якої обґрунтовують тип (типи) бурового розчину і хімічні реагенти, а на другому етапі – оптимальну рецептуру. Вибір оптимальної композиції біополімер-силікатного бурового розчину здійснювали за методом латинських планів експерименту за допомогою програми «Експериментатор».

З урахуванням викладеного, вибір рецептури бурового розчину для розкриття продуктивних пластів зводиться до задачі [9]:

$$\begin{cases} E_k(x^v) \rightarrow \min, & k \in K, v \in J, x^v \in D^v \\ \varphi(x^v) \leq 0 \end{cases}, (1)$$

де  $E_k(x^v)$  – критерій оптимальності як функція

концентрацій  $x^v = (x_1^v, x_2^v, \dots, x_n^v)^m$  реагентів  $v$ -го компонентного складу;

$J$  – клас можливих поєднань наборів реагентів;

$D^v$  – область визначення вектора  $x^v$ ;

$\varphi(x^v)$  – система обмежень на концентрації реагентів.

Формалізація задачі (1) вимагає побудови множини  $K$  локальних критеріїв оптимальності, формування класу  $J$  допустимих компонентних поєднань, побудови системи обмежень на керуючі параметри  $x^v$  та області їх визначення  $D^v$ .

Локальні критерії оптимальності мають враховувати вплив типу бурового розчину та його технологічних властивостей на ефективність розкриття продуктивних пластів в заданих гірничо-геологічних умовах буріння з урахуванням технічних, кон'юнктурних та економічних факторів. Очевидним є те, що критерії оптимальності мають враховувати особливості механізму забруднення продуктивних пластів і, що не менш важливо, сприяти підвищенню видобутку і вилучення вуглеводнів із пласта, а також зменшенню вартості спорудження свердловин. Такі вимоги щодо вибору типу бурового розчину та його рецептури можуть бути забезпечені обґрунтованими критеріями і системою обмежень на склад і технологічні властивості.

Використання біополімерних бурових розчинів, які можуть забезпечити відносно низькі значення напружень зсуву між шарами рідини при високих градієнтах швидкості зсуву та високі значення напружень при низьких градієнтах швидкості зсуву потребує ретельного контролю реологічних характеристик.

Для реалізації вибору оптимальної рецептури біополімер-силікатного бурового розчину виберемо критерії оптимальності [9], які у відповідних гірничо-геологічних умовах можуть бути використані для обґрунтування оптимальної рецептури бурового розчину:

відповідність  $m$  показників технологічних властивостей  $g_j(x^v)$  бурового розчину заданим  $\hat{g}_j(x^v)$  значенням:

$$E(x^v) = \sum_{j=1}^m \alpha_j (g_j(x^v) - \hat{g}_j(x^v))^2; \quad (2)$$

виносна здатність потоку в інтервалі  $[0, L]$  стовбура свердловини:

$$E(x^v) = \frac{1}{L} \int_0^L k_v(l, g(x^v)) dl, \quad (3)$$

де  $a_0^v$  – витрати на приготування одиниці об'єму бурового розчину, які не залежать від концентрацій реагентів;

$a^v = (a_1^v, a_2^v, \dots, a_n^v)^m$  – вартості одиниць концентрацій реагентів  $v$ -го компонентного складу;

$\alpha_j = S_j^{-2}$ ;  $S_j^2$  – дисперсія  $j$ -го параметра технологічних властивостей бурового розчину;

$k_v(l, g(x^v))$  – показник оцінки виносної здатності потоку як функція глибини  $l$  стовбура свердловини і технологічних властивостей  $g(x^v)$  бурового розчину.

**Результати досліджень.** Особливість рецептури біополімер-силікатного бурового розчину полягає в меншому вмісті біополімеру

Duo-vis та крохмалю і відповідно меншій вартості бурового розчину, а також добавкою рідкого скла та інгібітора.

З додаванням рідкого скла (силікату натрію) до розчину, ефективно підвищується стійкість стінки свердловин, зменшуються ризик осипання, корозія обсадної колони тощо [10]. В процесі буріння горизонтальної ділянки свердловини, коли буровий розчин поступає у пласт, відбувається гідратація сланців, їх набухання і диспергування, що призводить до зниження механічної міцності сланцю. Одним з найефективніших способів для запобігання осипання, каверноутворень і прихоплень за наявності глинистих осадових порід з високим вмістом води, є застосування силікатного бурового розчину [10].

Механізм підвищення стійкості стінок свердловин силікатною системою включає наступне: при надходженні силікату в пору пласта і контакті його з хімічними речовинами відбувається реакція, і утворюються тривимірні гелі і нерозчинні згустки, які на стінках свердловини перекривають пори сланцю і дрібні зазори; силікати пригнічують капілярний набухання і диспергації мінералів в сланці; можливість утворення нових речовин при реакції між силікатами і мінералами в глині, які призводять до підвищення стійкості стінок; силікати взаємодіють з KCl і NaCl.

До складу рецептури входять такі хімічні реагенти: модифікований і біологічно стабілізований крохмаль, використовується для контролю фільтрації бурових розчинів на водній основі, що супроводжується мінімальним збільшенням; ксантановий біополімер марки «Duo-vis» виробництва компанії «M-I Drilling Fluids», СМС-LV (карбоксиметилцелюлоза) – органічний колоїд, який застосовується в основному для зменшення фільтрації прісних і мінералізованих розчинів; силікат натрію використовують для приготування малосилікатних розчинів, які застосовують для попередження набухання та гідратації глиняних порід, схильних до обвалювання. Оптимальна домішка рідкого скла при цьому коливається від 2,0 % до 5,0 % мас.; NaCl (хлорид натрію) за ДСТУ 4568–95; NaOH (гідроксид натрію, каустична сода) використовують для збільшення рН. Обґрунтовано такі інтервали зміни впливових факторів концентрацій реагентів (% мас.): модифікований крохмальний реагент 0,8 – 1,5; ксантановий біополімер (Duo-vis) 0,1 – 0,6; карбоксиметилцелюлоза (СМС-LV) 0,25 – 0,35; силікат натрію 0,25 – 0,5; NaCl 10 – 15; гідроксид натрію (NaOH) – 0,2%.

Для побудови моделей залежно від діапазонів концентрацій реагентів можуть бути використані різні плани експериментів [11, 12]. Це плани для моделей першого порядку – ПФЕ (повний факторний експеримент) і ДФЕ (дробовий факторний експеримент), для моделей другого і вищих порядків – ЦКП (центральні композиційні плани), і за методом латинських квадратів.

Таблиця 1 – План експерименту для побудови базової рецептури біополімер-силікатного бурового розчину

Дослід	Реагенти та їх концентрації, мас. %				
	Duo-vis	СМС-LV	Крохмаль	NaCl	Силікат натрію
1	0.563	0.3	0.975	15	0.375
2	0.6	0.275	1.5	12.5	0.375
3	0.487	0.25	1.15	10	0.375
4	0.45	0.325	1.325	13.75	0.375
5	0.6	0.3	1.15	13.75	0.313
6	0.525	0.25	1.5	13.75	0.438
7	0.487	0.275	1.325	11.25	0.313
8	0.45	0.25	0.8	15	0.313
9	0.525	0.325	0.975	12.5	0.313
10	0.563	0.35	1.5	10	0.313
11	0.525	0.35	0.8	11.25	0.375
12	0.563	0.325	1.15	11.25	0.438
13	0.45	0.35	1.15	12.5	0.25
14	0.487	0.3	0.8	12.5	0.438
15	0.45	0.275	0.975	10	0.438
16	0.6	0.25	0.975	11.25	0.25
17	0.6	0.35	1.325	15	0.438
18	0.563	0.275	0.8	13.75	0.25
19	0.487	0.325	1.5	15	0.25
20	0.45	0.3	1.5	11.25	0.5
21	0.6	0.325	0.8	10	0.5
22	0.487	0.35	0.975	13.75	0.5
23	0.525	0.275	1.15	15	0.5
24	0.563	0.25	1.325	12.5	0.5
25	0.525	0.3	1.325	10	0.25

У таблиці 1 наведено плани ДФЕ (досліди 1 – 4) і ПФЕ (досліди 1 – 8) для побудови лінійних моделей, а також ОЦКП (досліди 1 – 25) для побудови моделі у вигляді поліному другого порядку.

Біополімер-силікатний буровий розчин в лабораторних умовах приготувляли у такій послідовності: у розрахованій кількості води протягом 30 хв проводили гідратацію модифікованого і біологічно стабілізованого крохмалю, потім додавали біополімер марки Duo-vis перемішуючи 20 хв, далі додавали карбоксиметилцелюлози СМС-LV перемішуючи 20 хв, потім додавали  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  і перемішували протягом 20 хв, після цього додавали хлористого натрію та NaOH (каустичну соду) і перемішували протягом 30 хв. Згідно з планом (табл. 2) була проведена серію експериментів з рецептурами (табл. 3).

Реологічні властивості визначались з допомогою ротаційного віскозиметра Fann 800. Обробка даних ротаційної віскозиметрії виконувалась у пакетному режимі із використанням програми «Rheometry» в класі реологічно стаціонарних моделей: Ньютона, Шведова-Бінгама, Оствальда, Гершеля-Балклі, Шульмана-Кессона. Найбільш адекватною для плану експерименту виявилась модель Гершеля-

Балклі. В таблиці 4 наведені оцінки реологічних властивостей  $(\hat{\tau}_0, k, n)$  біополімер-силікатного бурового розчину і дисперсій адекватності у кожній точці плану експерименту. На рисунку 2 показано реологічні криві для дослідів 15 і 16.

Після обробки даних властивостей отримано оптимальну рецептуру біополімерно-силікатного бурового розчину, мас. %: модифікований крохмаль – 0,98; Duo-vis – 0,45; СМС-LV – 0,35; силікат натрію – 0,275; NaCl – 12; NaOH – 0,2; вода – решта. Технологічні властивості оптимальної рецептури: густина 1080 кг/м<sup>3</sup>; умовна в'язкість 98 с;  $\text{CHZ}_{1/10}$  34/37,8 дПа; фільтрація 4 см<sup>3</sup>/30хв.; КТК – 0,054; найбільш адекватна реологічна модель Гершеля-Балклі,  $\tau_0 = 2,64$  Па  $k = 0,97$  Па·с<sup>n</sup>,  $n = 0,480$ .

## Висновки

На основі проведеного аналізу бурових розчинів, які використовують для буріння свердловин, виявлено тенденцію щодо використання біополімерних систем, які не містять глинистої фази, забезпечують низьку фільтрацію, мають достатньо високу термо- і солестій-

Таблиця 2 – Результати експерименту для вибору базової рецептури біополімер-силікатного бурового розчину

Дослід	Властивості бурового розчину при 20 °С				
	Густина, кг/м <sup>3</sup>	T, с	Ф, мл./30 хв.	СНЗ <sub>1/10</sub> , дПа	Коефіцієнт тертя кірки
1	1090	88	4	23,45/30,75	0,0972
2	1080	108	6	30,15/40,2	0,1035
3	1070	68	6	23,45/33,5	0,1155
4	1080	64	4	20,8/24,7	0,0972
5	1080	120	4	28,6/39	0,0394
6	1080	92	3,5	20,8/29,9	0,1008
7	1080	68	6	13/20,8	0,1026
8	1090	44	5	20,1/23,45	0,1051
9	1080	64	6	33,5/36,85	0,1026
10	1060	100	6	28,6/32,5	0,0614
11	1070	84	5,5	26,8/36,85	0,0981
12	1080	88	5,5	33,5/36,85	0,0956
13	1080	56	5	18,2/22,1	0,0827
14	1080	84	5	24,7/28,6	0,0891
15	1060	88	5,5	15,6/18,2	0,0854
16	1060	90	5,5	27,8/33,8	0,0598
17	1080	100	4,5	44,2/54,6	0,0749
18	1070	72	5	23,4/36,4	0,0561
19	1080	80	5,5	18,2/24,7	0,0667
20	1070	60	5,5	18,2/22,1	0,0492
21	1060	92	5	27,3/32,5	0,0623
22	1080	62	5	20,8/26	0,0972
23	1090	62	5	20,8/40,3	0,0525
24	1070	88	5	31,2/36,4	0,0972
25	1070	74	5,5	20,8/28,6	0,0465

Таблиця 3 – Результати визначення реологічних параметрів біополімер-силікатного бурового розчину

Дослід	Реологічні властивості найбільш адекватної моделі $\hat{v}$			Дисперсія адекватності, Па <sup>2</sup> , для реологічної моделі $\hat{v}$
	$\tau_0$ , Па	k, Па·с <sup>n</sup>	n	
1	3,43	0,7184	0,5283	0,0293
2	2,915	1,315	0,4464	0,0516
3	3,114	0,6212	0,5142	0,664
4	2,948	0,4288	0,5641	0,1231
5	3,475	1,111	0,4685	0,0686
6	2,294	0,8644	0,4877	0,0081
7	1,943	0,8387	0,4714	0,0389
8	1,423	0,5774	0,4896	0,0336
9	2,462	0,5912	0,5093	0,0186
10	2,639	0,9652	0,4763	0,0896
11	2,503	0,8537	0,4756	0,051
12	2,34	1,031	0,462	0,0065
13	2,182	0,6081	0,5171	0,032
14	2,448	0,7189	0,4845	0,0158
15	4,558	2,145	0,3576	0,1011
16	3,559	1,048	0,4587	0,0709
17	3,976	0,4392	0,5749	0,3918
18	3,214	0,8713	0,4703	0,0291
19	1,932	0,8139	0,4801	0,0395
20	1,993	0,5982	0,514	0,036
21	3,45	0,9822	0,4626	0,0273
22	2,593	0,6578	0,496	0,0139
23	2,379	0,6656	0,4984	0,0566
24	2,623	0,8505	0,4771	0,0337
25	2,349	0,7513	0,482	0,0203

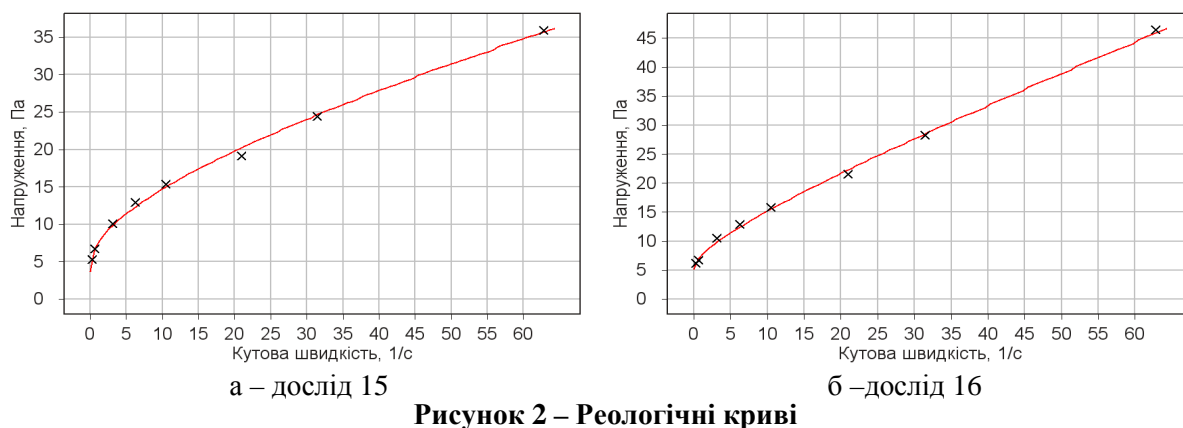
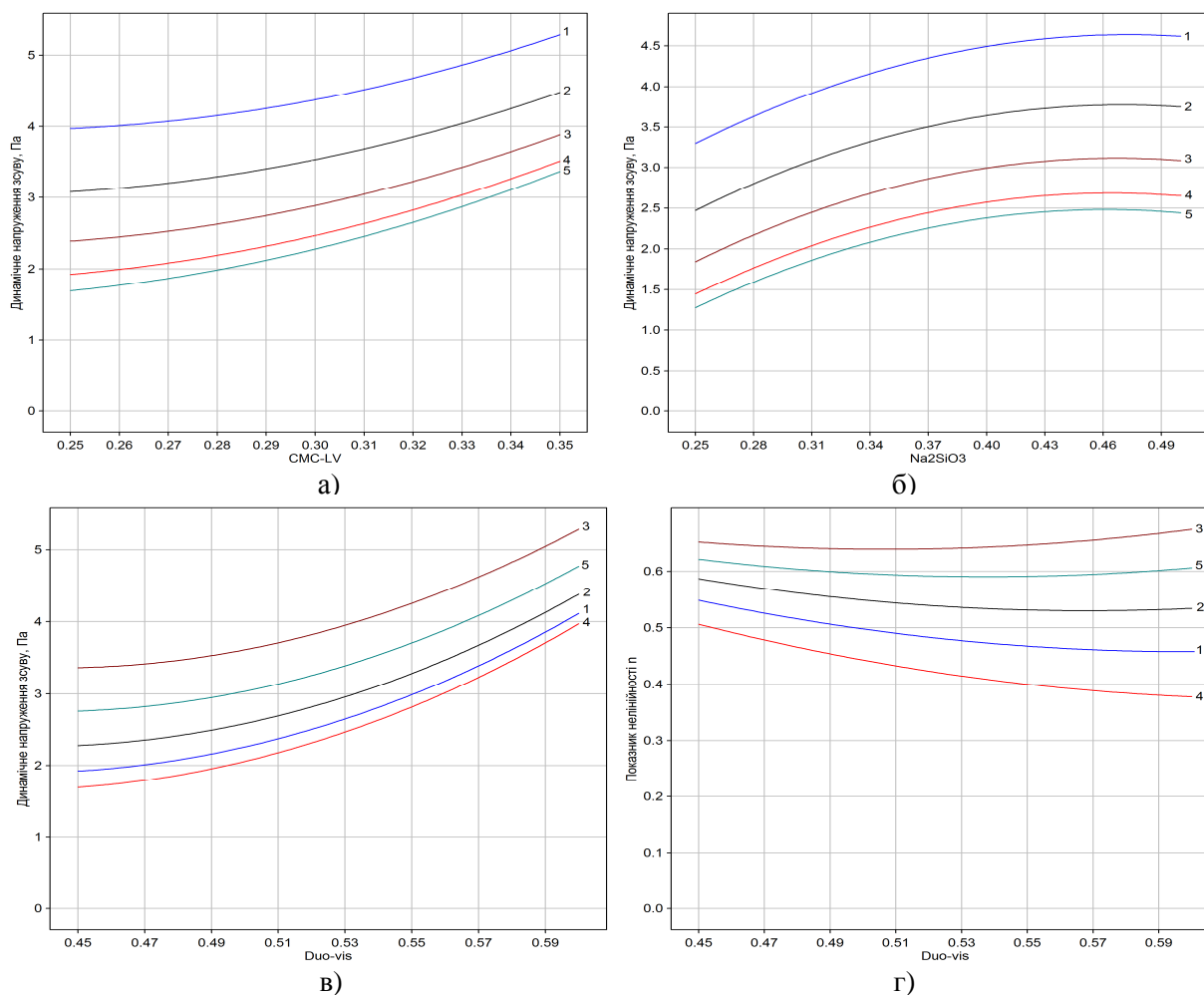


Рисунок 2 – Реологічні криві



а – карбоксиметилцелюлоза CMC-LV; б – силікат натрію  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  (зміна концентрації Duo-vis: 1 – 0,28 %; 2 – 0,3 %; 3 – 0,35 %; 4 – 0,4%; 5 – 0,45%); в, г – біополімер Duo-vis (зміна концентрації CMC-LV : 1 – 0,25 %; 2 – 0,275 %; 3 – 0,3 %; 4 – 0,325%; 5 – 0,35%)

**Рисунок 3 – Залежність впливу концентрації (%) хімічних реагентів на реологічні властивості біополімер-силікатного бурового розчину**

кість, запобігають набуханню і диспергуванню глинистих мінералів при бурінні горизонтальної ділянки свердловини.

За допомогою комп'ютерної програми «Експериментатор» проведено дослідження властивостей та отримано оптимальну рецептуру біополімерно-силікатного бурового розчину, при якому встановлено:

– зі збільшенням кількості силікату в розчині швидко підвищується стійкість стінки свердловин в ранні терміни і повільно підвищується стійкість в більш пізні терміни, реологічні характеристики розчинів стають гіршими і показник фільтрації збільшується при кількості силікату більше 5% в розчині. Тому кількість

додавання силікатів у процесі буріння не повинно бути більше 6%;

– додавання солі може призвести до взаємодії з силікатом, підвищуючи стійкість стінок свердловин. Оптимальна кількість доданої калієвої і натрієвої солі залежить від опору органічного агента бурового розчину.

– значення рН бурового розчину прямо зв'язується з кількістю силікату, який може сам забезпечувати рН бурового розчину. Наприклад, при додаванні силікату більше 2% в буровий розчин з низьким вмістом твердої фази, значення рН може перевищити 11. При додаванні силікату не більш 5% в буровий розчин з високим вмістом твердої фази, зазвичай необхідно додавати NaOH або КОН для підтримання значення рН більше 9, щоб буровий розчин встиг поступити в кільцевий простір і контактувати зі стінкою до гелеутворення силікату.

– в'язкість зі збільшенням кількості силікату майже не змінюється, але СНС і реологічні параметри значно підвищуються. При цьому захищається продуктивний пласт, оскільки здатність виносу шламів і очищення вибою підвищуються;

– вміст силікат натрію в якості наповнювача у біополімер-силікатному буровому розчині дає змогу дозволяє підвищити стійкість стінки свердловин та має здатність до очищення вибою від шламів.

### **Література**

1 Булатов А.И. Теория и практика заканчивания скважин: В 5 т. / А.И. Булатов, П.П. Макаренко, В.Ф. Будников, Ю.М. Басарыгин, Л.Б. Хусид. – М.: ОАО «Издательство Недра», 1997. – Т.1. – 395 с.

2 Мислюк М.А. Система вибору оптимальних рецептур обробки бурових розчинів / М.А. Мислюк, Ю.М. Салижин // Нафтова і газова промисловість. – 2007. – № 5. – С. 25 – 28.

3 Мислюк М.А. Деякі напрями удосконалення технологій спорудження свердловин на сланцевий газ / З.Д. Хоминець, Ю.М. Салижин, В.В. Богославец, Ю.Д. Волошин // Нафтова галузь України. – 2013. – №1. – С. 40–45.

4 Кустурова О.В. Розробка гуманно-біополімерного бурового розчину з низьким вмістом твердої фази для буріння свердловин в умовах родовищ Дніпровсько-Донецької западини: дис. канд. техн. наук: 05.15.10 / Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. – Івано-Франківськ, 2007. – 146 с.

5 Грей Дж.Р. Состав и свойства буровых агентов (промывочных жидкостей): Пер. с англ. / Дж.Р. Грей, Г.С.Г. Дарли. – М.: Недр, 1985. – 509 с.

6 Русанов А.И. Межфазная тензометрия / А.И. Русанов, В.А. Прохоров. – Санкт-Петербург, 1994. – 397 с.

7 Лубан Ю.В. Біокар – безглиниста промивальна рідина для буріння похило - скерованих і горизонтальних свердловин та розкриття продуктивних горизонтів / Ю.В. Лубан, Я.В. Кунцяк, С.В. Лубан, О.А. Білека, Д.М. Круль, Я.І. Кулик // Нафтова і газова промисловість. – 2008. – № 4. – С.18-21.

8 Бейзик О.С. Підвищення якості розкриття продуктивних горизонтів на родовищах Прикарпаття. / О.С Бейзик // Автореферат дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук. – Івано-Франківськ, 2011. – 20 с.

9 Богославец В.В. Вибір оптимальних рецептур бурових розчинів для розкриття нафтових пластів: дис. канд. техн. наук: 05.15.10 – Буріння свердловин / Івано-Франківський національний технічний ун-т нафти і газу. – Івано-Франківськ, 2014. – 146 с.

10 Ли Цзиньян Перспективы и современный опыт применения силиката щелочных металлов при бурении скважин / Цзиньян Ли // Нефтегазовое дело. – 2012. – №3. – С. 81-91.

11 Мыслюк М.А. О выборе рецептуры обработки бурового раствора с учетом термостойкости / М.А. Мыслюк, А.А. Васильченко, Ю.М. Салыжин, Е.В. Кустурова // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2006. – № 8. – С. 47 – 52.

12 Патент 2289603 Россия, МПК5 C09K7/02. Биополимерный буровой раствор / Е.В. Кустурова, О.А. Жуган, А.А. Васильченко, Н.В. Гордийчук, В.Л. Кушнарв (Украина): Заявл. 13.04.05; Опубл. 20.12.06, Бюл. №35. – 6 с.

13 Кунцяк Я.В. Розробка та впровадження комплексу технічних засобів і технологій буріння похило-скерованих і горизонтальних свердловин (для умов нафтогазових родовищ України) : дис. док. техн. наук: 05.15.10 / Івано-Франківський національний технічний ун-т нафти і газу. – Івано-Франківськ, 2013. – 332 с.

14 Мыслюк М.А. Исследование структурно-механических свойств биополимерной системы Биокар / М.А. Мыслюк, В.В. Богославец, Ю.В. Лубан, С.Н. Лубан, С.О. Ляшенко // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2016. - №1. – С. 34-38.

*Стаття надійшла до редакційної колегії  
24.11.16*

*Рекомендована до друку  
професором **Кондратом О.Р.**  
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)  
професором **Кунцяком Я.В.**  
(КБ «Конструкторське бюро  
бурового інструменту», м. Київ)*

## МЕТОД РОЗРАХУНКУ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

<sup>1</sup>В.М. Вакалюк, <sup>2</sup>Ю.М. Лях, <sup>1</sup>Я.В. Солоничний, <sup>1</sup>А.В. Вакалюк

<sup>1</sup>ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 727101,  
e-mail: no@nifg.edu.ua

<sup>2</sup>ТОВ «Юг-Нефтегаз»; 68001, м. Київ, вул. Раскової Марини, 23

Високопродуктивний буровий інструмент виготовляють із конструкційних матеріалів, яким притаманна велика твердість та значна пластичність. Такі властивості мають двофазні композиційні матеріали, які отримують при застосуванні обертових ливарних форм. В струмину розплавленого металу засипають твердосплавні гранули. Завдяки відцентровим силам вони переміщуються в розплавленій металевій матриці до зовнішньої робочої поверхні деталі. Під час її охолодження від температури кристалізації металу до кімнатної температури в об'ємі отриманого виробу виникає напружений стан внаслідок різниці термічних коефіцієнтів лінійного розширення матеріалів в'язкої матриці та гранул армітора із значною твердістю. Зменшення напруг в матриці і гранулі можна досягти покриттям гранул плакуючим шаром. В даній роботі розроблений метод розрахунку механічних напружень системи "металозв'язка – плакуючий шар – сферична гранула армітора".

Ключові слова: напружений стан, породоруйнуючий інструмент, композиційний матеріал, гранула, металічна матриця, плакуючий шар.

Высокопроизводительный буровой инструмент изготавливают из конструкционных материалов, обладающих большой твердостью и значительной пластичностью. Такие свойства имеют двухфазные композиционные материалы, получаемые при применении вращающихся литейных форм. В струю расплавленного металла засыпают твердосплавные гранулы. Благодаря центробежным силам они перемещаются в расплавленной металлической матрице к внешней рабочей поверхности детали. При ее охлаждении от температуры кристаллизации металла до комнатной в объеме полученного изделия возникает напряженное состояние в результате разницы термических коэффициентов линейного расширения материалов вязкой матрицы и гранул арматора со значительной твердостью. Уменьшение напряжений в матрице и грануле можно достичь покрытием гранул плакирующим слоем. В данной работе разработан метод расчета механических напряжений системы "металлосвязь – плакирующий слой – сферическая гранула арматора".

Ключевые слова: напряженное состояние, породоразрушающий инструмент, композиционный материал, гранула, металлическая матрица, плакирующий слой.

High productive drilling tool is made of structural materials, which are characterized by hardness and high ductility. These properties also belong to the two-phase composite materials, which are obtained by using pivoting moulds. Hard-alloy granules are poured into a molten metal stream. Due to centrifugal forces, they move into the molten metal matrix to the outer working surface of the materials. When it is cooled from the metal crystallization temperature to the room temperature, the stress state emerges in the volume of an obtained material, which is due to the difference of thermal linear expansion coefficients of materials of viscous matrix and armitor granules with considerable firmness. Stress reduction in matrix and granules can be obtained by covering the granules with a cladding layer. This paper deals with the development of the method for calculating the mechanical stresses of the "metal-on-metal connection – cladding layer – spherical armitora granule" system.

Keywords: stress state, drilling tools, composite material, metal matrix, granule, cladding layer.

**Вступ.** Під час буріння свердловин породоруйнуючий інструмент повинен поєднувати в собі високу твердість, що забезпечить достатню зносостійкість в абразивному середовищі, з пластичністю, яка буде запобігати появі тріщин і руйнуванню складових частин інструменту при ударах і великих змінних навантаженнях [1]. Однофазних конструкційних матеріалів з поєднанням таких властивостей практично не існує. Якщо матеріал достатньо твердий, то він, як правило, є крихкий. Пластичні ж матеріали є досить м'якими. Тому для високопродуктивного бурового інструменту вигідно використовувати двофазні композиційні матеріали, компоненти якого мають вищезгадані експлуатаційні характеристики. Суть одного із таких методів отримання робочих частин бурового інструме-

нту із композиційного матеріалу полягає в наступному. Ливарну форму обертають із необхідною кутовою швидкістю відносно її осі симетрії. При цьому в струмину розплавленого металу, який заливають в обертову ливарну форму, засипають твердосплавні гранули. Оскільки їх густина значно більша від густини металу, то завдяки відцентровим силам твердосплавні гранули переміщуються в розплавленій металевій матриці ближче до зовнішньої поверхні деталі. При її охолодженні від температури кристалізації металу до кімнатних температур в об'ємі отриманого виробу виникає напружений стан через різницю термічних коефіцієнтів лінійного розширення матеріалів матриці та твердосплавних гранул.

**Постановка проблеми.** Дослідження в роботі [2] напруженого стану композиційних матеріалів, отриманих згаданим вище технологічним методом, показали, що для існуючих промислових марок сталі і в металозв'язці, і в гранулі можуть виникати значні напруження. Зменшити величину цих напружень можна завдяки покриттю гранул плакуючим (захисним) шаром із відповідними коефіцієнтами термічного лінійного розширення та Пуассона і модулем Юнга. В даній роботі запропоновано метод розрахунку механічних напруг системи "металозв'язка – плакуючий шар – сферична гранула армітора".

**Виклад основного матеріалу.** Для проведення теоретичного аналізу напруженого стану в композиційних матеріалах слід прийняти припущення, які не порушують адекватності математичної моделі процесу виникнення напружень:

- а) твердосплавні гранули мають форму куляк заданого радіуса;
- б) відстані між сусідніми гранулами великі в порівнянні з їхніми розмірами;
- в) за будь-якої температури радіуси сферичних порожнин в матеріалі матриці відповідають радіусам гранул, покритих захисним шаром або вільних від нього, тобто існує ідеальна адгезія між межуючими поверхнями компонентів композиційного оснащення;
- г) плакування твердосплавних гранул відбувається за температури кристалізації матеріалу металозв'язки;

д) модулі Юнга, коефіцієнти Пуассона і термічні коефіцієнти лінійного розширення не залежать від температури в широкому діапазоні.

Прийняті припущення є повністю реальними і практично не спотворюють умов виникнення напруженого стану в армованій зоні.

Відомо [3,4], що нормальне  $\sigma_n$  і тангенціальне  $\sigma_\tau$  напруження в сферичних оболонках описуються співвідношеннями:

$$\sigma_n = \frac{p_1 r_1^3 - p_2 r_2^3}{r_2^3 - r_1^3} + (p_1 - p_2) \frac{r_1^3 r_2^3}{r^3 (r_2^3 - r_1^3)}, \quad (1)$$

$$\sigma_\tau = \frac{p_1 r_1^3 - p_2 r_2^3}{r_1^3 - r_2^3} + (p_1 - p_2) \frac{r_1^3 r_2^3}{2r^3 (r_2^3 - r_1^3)}, \quad (2)$$

- де  $r_1$  – внутрішній радіус;
- $r_2$  – зовнішній радіус;
- $p_1$  – внутрішній тиск;
- $p_2$  – зовнішній тиск.

Напруження в суцільній кулі можна визначити із співвідношень (1) і (2) за умови  $r_1 = 0$ :

$$\sigma_n = \sigma_\tau = -p_2. \quad (3)$$

Вираз для напружень в сферичній порожнині можна отримати із співвідношень (1) і (2) за умови  $r_2 \gg r_1$ ;  $p_2 = 0$ ;  $r \gg r_1$ :

$$\sigma_n = -p_1 \frac{r_1^3}{r^3}, \quad (4)$$

$$\sigma_\tau = p_1 \frac{r_1^3}{2r^3}, \quad (5)$$

де  $r$  – відстань від центра гранули до вибраної (заданої) точки.

Для досить тонкої оболонки товщиною

$$h = r_2 - r_1 \ll r = \frac{r_1 + r_2}{2},$$

середнє значення напружень отримується при аналізі співвідношень (1) і (2), якщо знехтувати доданками з величинами, що вищі першого порядку малості:

$$\langle \sigma_n \rangle = -\frac{p_1 + p_2}{2}, \quad (6)$$

$$\langle \sigma_\tau \rangle = \frac{(p_1 - p_2)r}{2h}. \quad (7)$$

В роботі [2] отримано вирази для обчислення тангенціальних і нормальних напружень у компонентах композиційного матеріалу, отриманого при об'ємному армуванні металічної матриці твердосплавними сферичними гранулами без захисного шару. Напружений стан композиційного матеріалу, отриманого при об'ємному армуванні металічної матриці твердосплавними сферичними гранулами, покритими захисним (плакуючим) шаром, можливо проаналізувати за допомогою рис. 1, на якому зображена гранула радіусом  $r_1$ , з товщиною захисного шару  $h$ , що міститься в сферичній порожнині металозв'язки радіусом  $r_2 = r_1 + h$ .

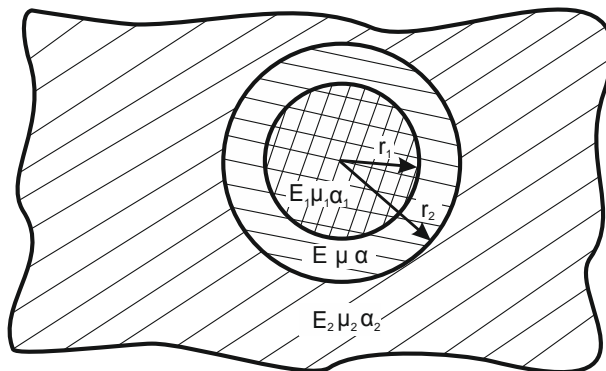


Рисунок 1 – Гранула армітора з плакуючим шаром в металевій матриці

В кулеподібних тілах деформація при всесторонньому стисканні або розтягу спрямована в усіх напрямках вздовж радіуса і є тільки функцією радіуса [3]. Згідно з узагальненим законом Гука [3,4] відносна деформація гранули при охолодженні композиційного матеріалу від температури кристалізації металозв'язки до кімнатної на  $\Delta T$  отримується виразом:

$$\frac{\Delta r_1}{r_1} = \frac{2\mu_1 - 1}{E_1} p_1 + \alpha_1 \Delta T, \quad (8)$$

де  $E_1$ ,  $\mu_1$ ,  $\alpha_1$  – модуль Юнга, коефіцієнт Пуассона і термічний коефіцієнт лінійного розширення матеріалу гранули відповідно;

$p_1$  – встановлений тиск на межі розділу гранули і захисного шару.

При цьому відносна деформація захисного шару в області, яка межує з гранулою, становить:

$$\frac{\Delta r_1'}{r_1} = \frac{1}{E} \left[ \frac{\mu(3p_2r_2^3 - 2p_1r_1^3 - p_1r_2^3)}{r_2^3 - r_1^3} - p_1 \right] - \alpha \Delta T, \quad (9)$$

де  $E, \mu, \alpha$  – модуль Юнга, коефіцієнт Пуассона і термічний коефіцієнт лінійного розширення матеріалу захисного шару відповідно;

$p_1$  – встановлений тиск на межі захисного шару і гранули.

Зіставивши вирази (8) і (9) з врахуванням того, що  $\Delta r_1' = -\Delta r_1$ , отримуємо вираз:

$$\frac{2\mu_1 - 1}{E_1} p_1 - \frac{p_1}{E} + \frac{\mu(3p_2r_2^3 - 2p_1r_1^3 - p_1r_2^3)}{E(r_2^3 - r_1^3)} = (\alpha - \alpha_1)\Delta T. \quad (10)$$

Відносна деформація захисного шару в області, яка межує з металозв'язкою становить:

$$\frac{\Delta r_2}{r_2} = \frac{1}{E} \left[ \frac{\mu(p_2r_1^3 + 2p_2r_2^3 - 3p_1r_1^3)}{r_2^3 - r_1^3} - p_2 \right] + \alpha \Delta T. \quad (11)$$

Відносна деформація металозв'язки в цій же області рівна:

$$\frac{\Delta r_2'}{r_2} = -\frac{\mu_2 + 1}{E_2} p_2 - \alpha_2 \Delta T, \quad (12)$$

де  $E_2, \mu_2, \alpha_2$ , – модуль Юнга, коефіцієнт Пуассона і термічний коефіцієнт лінійного розширення матеріалу металозв'язки відповідно;

$p_2$  – встановлений тиск на межі захисного шару і металозв'язки.

Із порівняння співвідношень (11) і (12) з урахуванням того, що  $\Delta r_2' = -\Delta r_2$ , отримуємо:

$$\frac{\mu(p_2r_1^3 + 2p_2r_2^3 - 3p_1r_1^3)}{E(r_2^3 - r_1^3)} - \frac{p_2}{E} - \frac{(\mu_2 + 1)p_2}{E_2} = \Delta T(\alpha_2 - \alpha). \quad (13)$$

Використовуючи прості алгебраїчні перетворення виразів (10) і (13), можна отримати систему лінійних рівнянь:

$$\begin{cases} a_1 p_1 + b_1 p_2 = c_1 \\ a_2 p_1 + b_2 p_2 = c_2 \end{cases}, \quad (14)$$

із якої знайдемо вирази для обчислення межових тисків

$$p_1 = \frac{b_2 c_1 - b_1 c_2}{a_1 b_2 - a_2 b_1} \quad \text{і} \quad p_2 = \frac{a_2 c_1 - a_1 c_2}{a_2 b_1 - a_1 b_2}, \quad (15)$$

де

$$\begin{aligned} a_1 &= \frac{2\mu_1 - 1}{E_1} - \frac{1}{E} - \frac{\mu(2r_1^3 + r_2^3)}{E(r_2^3 - r_1^3)}; & b_1 &= \frac{3\mu r_2^3}{E(r_2^3 - r_1^3)}; \\ c_1 &= \Delta T(\alpha - \alpha_1); \\ a_2 &= -\frac{3\mu r_1^3}{E(r_2^3 - r_1^3)}; & b_2 &= \frac{\mu(r_1^3 + 2r_2^3)}{E(r_2^3 - r_1^3)} - \frac{1}{E} - \frac{\mu_2 + 1}{E_2}; \\ c_2 &= \Delta T(\alpha_2 - \alpha). \end{aligned}$$

Підстановка знайдених із (15) значень тисків  $p_1$  і  $p_2$  у співвідношення (3) – (7) дає змогу оцінити напруги в тврдосплавній гранулі, захисному шарі і металозв'язці.

Таким чином, нормальне і тангенціальне напруження в гранулі буде рівне:

$$\sigma_n = \sigma_\tau = -p_1. \quad (16)$$

Середні значення нормального і тангенціального напружень в плакуючому шарі обчислюються за формулами:

$$\langle \sigma_n \rangle = -\frac{p_1 + p_2}{2}, \quad (17)$$

$$\langle \sigma_\tau \rangle = \frac{(p_2 - p_1)r_3}{2h}, \quad (18)$$

де  $r_3 = \frac{r_1 + r_2}{2}$ ,

$h = r_2 - r_1$  – товщина захисного шару.

Значення нормального і тангенціального напружень в металозв'язці обчислюються за формулами:

$$\sigma_n = -p_2 \frac{r_2^3}{r_3^3}, \quad (19)$$

$$\sigma_\tau = p_1 \frac{r_1^3}{2r_3^3}. \quad (20)$$

За відсутності захисного шару згідно з [1] тиск на межі гранули і металозв'язки обчислюється за формулою:

$$p = \frac{E_1 E_2 \Delta T (\alpha_2 - \alpha_1)}{E_2 (2\mu_1 - 1) - E_1 (\mu_2 + 1)}, \quad (21)$$

а напруження в гранулі

$$\sigma_n = \sigma_\tau = -[p], \quad (22)$$

та металозв'язці

$$\sigma_n = -[p] \frac{r_1^3}{r_3^3}, \quad (23)$$

$$\sigma_\tau = [p] \frac{r_1^3}{2r_3^3}. \quad (24)$$

Користуючись таблицями фізичних величин [5] і проводячи розрахунки за формулами (15) і (21), можна підібрати для заданих матеріалів, із яких виготовлені гранули і металозв'язка, такий матеріал захисного шару і його товщину  $h$ , щоб тиски  $p_1$  і  $p_2$  на межах захисного шару із гранулою і металозв'язкою були набагато меншими від тиску  $p$  на межі металозв'язки і гранули без захисного шару. Із аналізу виразів (16) – (24) випливає, що чим менші значення межових тисків, тим менші напруження в гранулах та металозв'язці. Таким чином, наявність захисного шару в гранулі призведе до зменшення радіальних і тангенціальних напружень в гранулах і металозв'язці.

Наприклад, для металозв'язки, виготовленої зі сталі марки 70X5Г9ФТМ ( $E_2 = 20 \cdot 10^{10}$  Па;  $\mu_2 = 0,25$ ;  $\alpha_2 = 15 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$ ) і гранули, виготовленої із сплаву ТН-20 ( $E_1 = 40 \cdot 10^{10}$  Па;  $\mu_1 = 0,205$ ;  $\alpha_1 = 7,1 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$ ) радіусом  $r_1 = 1$  мм, покритої шаром нікелю ( $E = 20,2 \cdot 10^{10}$  Па;  $\mu = 0,3$ ;  $\alpha = 18 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$ ) товщиною  $h = 0,1$  мм, при зміні температури  $\Delta T = -1400$  К даного композиційного матеріалу, яка рівна різниці кінцевої температури композиційного матеріалу (температури навколишнього середовища) і початкової температури (температури кристалізації даної сталі), тиски на межі захисного шару з гранулою та металозв'язкою відповідно рівні  $p_1 = 0,91 \cdot 10^9$  Па. Ці значення тисків значно менші від тиску  $p = 1,4 \cdot 10^9$  Па на межі металозв'язки і гранули

без захисного шару. Отже і напруження в металазв'язці і гранулі будуть меншими за наявності плакуючого шару.

### **Висновки**

Запропонований метод розрахунку механічних напружень системи «металозв'язка – плакуючий шар – сферична гранула армітора» дає можливість завчасно визначати величину напружень, що дасть можливість оптимізувати процес виготовлення композиційних матеріалів та забезпечити раціональну їх експлуатацію.

Даний метод розрахунку напруженого стану композиційних матеріалів також можна використовувати при розробці і виготовленні клинових захоплювачів бурових роторів та захоплювачів ключів для згвинчування – розгвинчування і розкріплення різьбових з'єднань труб нафтового сортаменту.

### **Література**

- 1 Бугай Ю.Н. Центробежно-армированный породоразрушающий буровой инструмент. Ю.Н. Бугай, И.В. Воробьев. – Львов: Высшая школа, И-во при Львовском у-те, 1989. – 208 с.
- 2 Солоничний Я. В. Напружено-деформований стан композиційних матеріалів / Я. В. Солоничний, В. М. Вакалюк, Ю. М. Лях, Д. Ю. Журавльов // Науковий вісник ІФНТУНГ. – 2011. – №2(28). – С. 28-30.
- 3 Писаренко Г.С. Опір матеріалів / Г.С. Писаренко, О.Л. Квітка, Е.С. Уманський. – К.: Вища школа, 2004. – 655 с.
- 4 Посацький С.Л. Опір матеріалів / С.Л. Посацький. – Львів, 1983. – 403 с.
- 5 Кикоин И.К. Таблицы физических величин. Справочник / Под ред. И.К.Кикоина. – М.: Атомиздат, 1976. – 1008 с.
- 6 Пітулей Л.Д. Технологічне забезпечення віброармування зубків бурового інструменту: дис. канд. техн. наук: спец.05.02.08 «Технологія машинобудування» / Лоліта Дмитрівна Пітулей. – Івано-Франківськ, 2008. – 237 с.
- 7 Сорокин Г.М. Виды износа при ударном контактировании поверхностей / Г.М. Сорокин // Машиностроение. – 1974. – № 3. – С. 89-94.

*Стаття надійшла до редакційної колегії  
01.12.16*

*Рекомендована до друку  
професором **Чудиком І.І.**  
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)  
канд. техн. наук **Тарабаріновим П.В.**  
(НДПІ ПАТ «Укрнафта», м. Івано-Франківськ)*

## МЕТОД ОДНОЧАСНОГО І ВЗАЄМОЗВ'ЯЗАНОГО РОЗРАХУНКУ РОЗПОДІЛІВ ТИСКУ І ТЕМПЕРАТУРИ ВЗДОВЖ СТОВБУРА ГАЗОВОЇ СВЕРДЛОВИНИ І ПОХИЛОГО ГАЗОПРОВОДУ

<sup>1</sup>Р. В. Бойко, <sup>2</sup>Н. Я. Заливаха

<sup>1</sup>УМГ “Львівтрансгаз”; 79000, м. Львів, вул. Рубчака, 3, тел. (0322) 2635130,  
e-mail: rboyko@ltg.lviv.ua

<sup>2</sup>ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 727196,  
e-mail: public@nung.edu.ua

Запропоновано систему двох диференціальних рівнянь, що включають рівняння нерозривності, руху, енергії і стану реального газу, із урахуванням теплоти внаслідок газомеханічного тертя. Звідси після запропонованого поділу потоку на елементарні ділянки одночасно і взаємозв'язано розраховуються тиск і температура газу в будь-якій точці стовбура свердловини (або похило прокладеного газопроводу), в т.ч. на його кінцях (на гирлі або на вибої), тобто визначаються розподіли тиску і температури вздовж газового потоку.

Ключові слова: баротермічні умови в газовій свердловині та в трубопроводі, газомеханічне тертя в газовому потоці, енергія газового потоку.

Предложена система двух дифференциальных уравнений, включающих уравнения неразрывности, движения, энергии и состояния реального газа, с учетом выделяемой теплоты вследствие газомеханического трения. Отсюда после предложенного деления потока на элементарные участки одновременно и взаимосвязано определяются давление и температура газа в любой точке ствола скважины (или наклонно проложенного газопровода), в т.ч. на его концах (на устье или на забое), то есть определяются распределения давления и температуры вдоль газового потока.

Ключевые слова: баротермические условия в газовой скважине и трубопроводе, газомеханическое трение в газовом потоке, энергия газового потока.

The system of two differentials, that contain continuity equation, equations of motion, power and condition of gas has been offered, taking into account the heat energy due to mechanical friction. Hereof after the proposed distribution of flow into sections, the gas pressure and temperature are determined simultaneously and interdependently at any point of a wellbore (or an inclined pipeline), as well as on its ends (on well head or down the hole), i.e. pressure and temperature distributions are determined along the gas flow.

Key words: barothermal conditions in a gas well and pipeline, mechanical friction in the gas flow, the gas flow energy.

### Вступ

Забезпечення більшої точності проектних розрахунків роботи будь-якої системи сприяє підвищенню ефективності функціонування її [1]. Сучасна комп'ютеризація в науці і техніці уможливило підняти розрахунок газодинамічного і температурного режимів роботи газових свердловин, у т.ч. похило-спрямованих, на якісно вищий рівень [2]. Тиск на вибої газової свердловини є основним визначальним параметром роботи як газового покладу [3], так і газової свердловини [4], а з ним пов'язаний через рівняння балансу тисків і тиск на викиді із свердловини, тобто вибійний тиск узгоджує роботу системи «продуктивний пласт – свердловина – шлейф» [2]. У покладі, свердловині та шлейфі змінюються і тиск (газодинамічний режим роботи), і температура (термодинамічний режим), а тиск і температура є взаємно залежними параметрами стану газу, як і будь-якої речовини [5]. Тому розрахунки тиску і температури при проектуванні чи аналізі роботи свердловини необхідно виконувати одночасно і спільно, взаємопов'язано, а саме потік газу слід розглядати як неізотермічний. Це ж стосується і похилих газопроводів.

### Аналіз сучасних досліджень

У цьому аспекті враховуються умови неізотермічного руху газу в роботах В. С. Яблонського і В. Д. Белоусова, Л. Н. Кудряшова і В. А. Цецеріна, І. А. Чарного, Ю. П. Коротаєва, С. А. Бобровського, В. І. Чернікіна, С. Г. Щербакова, М. А. Гусейн-заде та інш. Пропонується вводити поправковий коефіцієнт на неізотермічність руху, априорі задавати середню температуру як середньологарифмічну (якщо залежність температури від глибини виражати прямою) або як середньоарифметичну (за невеликого відношення до 3,0 заданих вибійної і гирлової температури з точністю до 10 %) [4,6], істотно спрощувати отримані диференціальні рівняння з метою можливого інтегрування їх.

За існуючими методиками (з різною точністю) [4, 6, 7] розподіли тиску і температури газового потоку вздовж стовбура свердловини розраховуються окремо, незалежно один від одного, зокрема не враховується підвищення температури газу внаслідок газомеханічного тертя, яке за певної швидкості газу може відігравати суттєву роль, наприклад, при визначенні розміщення зони можливого гідратуотворення.

**Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми**

Усталений неізотермічний рух газу описується системою рівнянь нерозривності потоку, руху, енергії і стану газу, але не враховано підвищення температури за рахунок тертя, зміну внутрішньої енергії потоку в результаті теплопровідності в радіальному і вертикальному напрямках.

**Формулювання цілей статті**

Пропонуються аналітичне врахування названих чинників і метод розрахунку, коли зміни тиску і температури вздовж стовбура вертикальної чи похило-спрямованої газової свердловини визначаються із системи рівнянь, тобто одночасно і взаємопов'язано, причому метод поширюється і на похило прокладені газопроводи.

**Висвітлення основного матеріалу дослідження**

Усталений неізотермічний рух реального газу у стовбурі свердловини описуємо системою рівнянь нерозривності (суцільності) потоку, руху, енергії (перший закон термодинаміки) і стану газу.

Якщо рух газу є усталеним (стаціонарним), тобто через кожний поперечний переріз каналу (труби) за одиницю часу протікає одна і та ж маса газу, то рівняння нерозривності потоку записуємо так:

$$\frac{d(\rho_r w)}{dz} = 0, \quad (1)$$

а тоді для усталеного руху за певної швидкості газу в кожному перерізі потоку масова витрата газу

$$F w \rho_r = G = \text{const} \quad (2)$$

або

$$G = \frac{F w}{v} = F w \rho_r = \frac{F_1 w_1}{v_1} = \frac{F_2 w_2}{v_2} = \text{const}, \quad (3)$$

де  $G$  – масова витрата газу, кг/с;  
 $w$  – об'ємна (лінійна) швидкість газу, м/с;  
 $F$  – площа поперечного перерізу каналу, м<sup>2</sup>;

$v$  – питомий об'єм газу, м<sup>3</sup>/кг;

$\rho_r$  – густина газу, кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_r = 1/v$ ;

$z$  – вертикальна просторова координата (відрахована від вибою свердловини), м;

індекси 1 і 2 позначають перерізи потоку.

Рівняння руху газу виражаємо узагальненим рівнянням Бернуллі в механічній формі, яке отримується із закону зміни кількості руху для потоку стисливого флюїду (середовища), причому втрату напору на тертя  $dh_{\text{тер}}$  виражаємо, як це прийнято в газовій динаміці [8], формулою Дарсі-Вейсбаха в диференціальній формі, тобто

$$dz + \frac{dp}{\rho_r g} + d\left(\frac{w^2}{2g}\right) + \lambda \frac{1}{d} \frac{w^2}{2g} dx = 0, \quad (4)$$

де  $p$  – тиск газу, Па;

$g$  – прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>;

$dh_{\text{тер}}$  – втрата напору газу на тертя на ділянці стовбура свердловини довжиною  $dx$ , м;

$\lambda$  – коефіцієнт гідравлічного опору;

$dx = dz/\cos \alpha_3 = dz \sin \beta$ ;

$\alpha_3$  – зенітний кут (від вертикалі) нахилу свердловини;

$\beta$  – кут нахилу свердловини до горизонталі.

Під час руху газу у свердловині механічна енергія, яка витрачається на прискорення потоку газу (інерційний, швидкісний напір), є відносно невеликою, а тому з наближенням, достатньо прийнятним для практичних цілей, можна припустити, що  $d(w^2/2g) \approx 0$ . Тоді рівняння руху газу записується так:

$$dz + \frac{dp}{\rho_r g} + \lambda \frac{1}{d} \frac{w^2}{2g} dx = 0. \quad (5)$$

Рівняння стану реального газу виводимо із узагальненого закону Клапейрона-Менделєєва у вигляді:

$$\frac{\rho_{r0}}{\rho_r} = \frac{z_r T p_0}{z_{r0} T_0 p}, \quad (6)$$

де  $z_r$ ,  $z_{r0}$ ,  $\rho_r$ ,  $\rho_{r0}$  – відповідно коефіцієнти стисливості (надстисливості) газу і густини газу для двох станів за умов біжучих тиску  $p$  та температури  $T$  і стандартних тиску  $p_0$  та температури  $T_0$ .

Температура потоку газу у свердловині знижується внаслідок втрат теплоти через теплопередачу в навколишнє середовище, дросельного ефекту охолодження газу при зменшенні його тиску (вздовж напрямку руху) і підвищується за рахунок дисипативних втрат (зумовлених тертям) гідродинамічної енергії. У разі практичних розрахунків температури потоку газу у свердловині, газопроводі і газовому пласті ефектом адіабатичного охолодження (чи нагрівання) нехтують [7].

У відомих розв'язках рівняння збереження енергії, як правило, не враховується підвищення температури газу за рахунок тертя, яке за певної швидкості може відігравати суттєву роль, а отримати точний розв'язок із урахуванням цієї складової не вдається. У зв'язку з цим нами виведено рівняння збереження енергії наступним чином.

Згідно з першим початком (законом) термодинаміки теплота, яка надається системі (чи відводиться від неї), витрачається на зміну її внутрішньої енергії (внутрішньої кінетичної енергії хаотичного теплового руху мікрочастинки системи та внутрішньої потенціальної енергії взаємодії цих частинок) і на виконання нею роботи проти зовнішніх сил:

$$dQ = dU + dA, \quad (7)$$

де  $dQ$  – елементарна (нескінченно мала) кількість підведеної або відведеної теплоти (для потоку газу на розглядуваній ділянці руху);

$dU$  – зміна внутрішньої енергії системи (газу у відповідних перерізах потоку);

$dA$  – елементарна робота, виконувана газом.

Зміна кількості енергії в системі (тілі) відбувається тільки в тому випадку, якщо вона вступає у взаємодію з іншими системами, передаючи їм частину своєї енергії або приймаючи від них частину їхньої енергії, тобто кількість енергії в макротілі може змінюватися тільки в процесі енергообміну з іншими тілами. Це передавання енергії може здійснюватися двома відомими способами – через роботу або теплообмін між тілами. Обидва способи передавання енергії не є рівноцінними. Якщо виконана робота може бути витрачена на підвищення будь-якого виду енергії, то теплота без попереднього перетворення в роботу витратиться тільки на збільшення внутрішньої енергії термодинамічної системи.

Хоч теплота  $Q$  і робота  $A$  мають одну і ту ж одиницю вимірювання, як і енергія (джоуль), вони не є видами енергії, а являють собою два способи передавання її і, отже, можуть проявлятися тільки в процесі передавання теплоти або під час виконання роботи.

При механічній взаємодії тіл і навколишнього середовища тіло, яке знаходиться під вищим тиском, виявляє силове діяння на тіло з нижчим тиском. Це силове діяння зовні проявляється як робота одного тіла над іншим і є передаванням частини енергії першого тіла другому до настання рівноваги, тобто до вирівнювання тисків.

Роботу сил тиску при зміні об'єму системи називають деформаційною роботою. Відомо із термодинаміки, що елементарна деформаційна робота середовища з тиском  $p$  при зміні об'єму  $V$  становить

$$dA = pdV, \quad (8)$$

тобто величина  $p$  розглядається як узагальнена сила, різниця якої між середовищем і системою викликає процес, а величина  $V$  – як узагальнена координата, що змінюється під впливом цієї сили (пригадаймо, що робота дорівнює добутку сили на переміщення). Отже, робота сил тиску в елементарному процесі дорівнює добутку узагальної сили на диференціал узагальної координати.

Тоді рівняння першого закону термодинаміки (7) переписуємо у вигляді:

$$dQ = dU + dA = dU + pdV, \quad (9)$$

або відповідно для 1 кг робочого тіла

$$dq = du + da = du + pdv, \quad (10)$$

де  $v$  – питомий об'єм тіла;

$$Q = Gq; U = Gu; A = Ga; V = Gv;$$

$G$  – маса тіла.

Додаємо і віднімаємо в правій частині рівняння (9) член  $Vdp$ , а тоді, враховуючи, що

$$U + pV = I,$$

отримуємо

$$dQ = dI - pdV \quad (11)$$

або рівняння енергії для 1 кг робочого тіла

$$dq = i - pdv, \quad (12)$$

де  $I(p,T)$ ,  $i(p,T)$  – ентальпії системи як функції тиску  $p$  і температури  $T$  відповідно для маси  $G$  і 1 кг газу;  $I = iG$ .

Для усталеного (стаціонарного) процесу руху газу через канал рівняння енергії для маси  $G$  кг газу набуває вигляду:

$$dQ = dU + dA' + G \frac{dw^2}{2} + Ggdz, \quad (13)$$

де  $dQ$  – елементарна кількість теплоти, яка підводиться або відводиться від газу на розглядуваній ділянці між перерізами 1 і 2, Дж;

$dU$  – зміна внутрішньої енергії газу у відповідних перерізах, Дж;

$dA'$  – елементарна робота газу проти зовнішніх сил, Дж;

$G \frac{dw^2}{2}$  – приріст кінетичної енергії газу при його переміщенні на виділеній ділянці, Дж;

$Ggdz$  – елементарна робота проти сил тяжіння, Дж.

Робота газу проти зовнішніх сил у потоці газу є роботою, яка витрачається на його проштовхування. Для її визначення розглядаємо одновимірний (у трубі) рух газу. Між перерізами 1 і 2 виділяємо деяку масу газу. Потік, що припливає до перерізу 1, виконує функцію поршня, який витісняє газ, котрий заповнює канал. Тиск газу, площа перерізу і швидкість газу в перерізі 1 становлять  $p$ ,  $F$  і  $w$ , а між перерізами вони набувають змін відповідно  $dp$ ,  $dF$  і  $dw$ . На виділену масу газу в каналі зліва діє сила  $pF$ , а справа – сила  $(p + dp)(F + dF)$ . Тоді робота з переміщення –

$$dA' = (p + dp)(F + dF)(w + dw) - pFw. \quad (14)$$

Після скорочення і відкидання малих величин другого і вищого порядків маємо:

$$dA' = pFdw + pFdF + wFdp \quad (15)$$

або

$$dA' = pd(Fw) + Fwdp. \quad (16)$$

Оскільки за рівнянням нерозривності потоку  $Fw = Gv$ , а масова витрата  $G$  є величиною постійною, то стосовно суцільного середовища отримуємо:

$$dA' = G(pdv + vdp) = Gd(pv). \quad (17)$$

Відносячи роботу проти зовнішніх сил до 1 кг газу, маємо:

$$da' = d(pv) = pdv + vdp. \quad (18)$$

Величина  $pdv$  у визначає елементарну роботу, яку виконує переміщений об'єм газу за умови, що виділена маса газу є нестисливою.

Другий доданок – елементарна робота, яку переміщений об'єм газу виконує в результаті деформації під дією рівномірно розподіленого тиску (деформаційну роботу).

Підставивши роботу проти зовнішніх сил у рівняння енергії (13) і записавши його для 1 кг газу, отримуємо:

$$dq = du + da' + \frac{dw^2}{2} + g dz = du + d(pv) + \frac{dw^2}{2} + g dz = d(u + pv) + \frac{dw^2}{2} + g dz, \quad (19)$$

а оскільки  $u + pv = i$ , то рівняння енергії для 1 кг газу

$$dq = di + \frac{dw^2}{2} + g dz. \quad (20)$$

Рівняння енергії (20) свідчить, що теплота, яка надається рухомому газу, витрачається на: а) приріст ентальпії; б) приріст зовнішньої кінетичної енергії, тобто на збільшення швидкості газового потоку, і приріст зовнішньої потенціальної енергії.

Для руху газу рівняння енергії (20) та (12) справедливі; прирівнюючи їх, отримуємо:

$$di - v dp = di + \frac{dw^2}{2} + g dz, \quad (21)$$

тобто

$$\frac{dw^2}{2} + g dz = -v dp. \quad (22)$$

Приріст зовнішньої кінетичної енергії тіла, рівний  $-\int_1^2 v dp$ , називається можливою роботою, яка може бути використана в машинах і перетворена в інші види енергії.

Для необоротних потоків, які, на відміну від розглянутих вище оборотних потоків, супроводжуються дією сил тертя, рівняння (20) повинно бути доповнене двома членами: одним, який враховує роботу на подолання сил тертя  $-a_{\text{тер}}$ , та другим, що виражає приріст теплоти в газовому потоці внаслідок тертя  $-q_{\text{тер}}$ . Оскільки робота, спрямована супротив сил тертя повністю переходить у теплоту ( $a_{\text{тер}} = q_{\text{тер}}$ ), то ці два члени є однаковими за величиною, мають різний знак, і тому взаємно компенсуються. Отже, наявність дисипативної сили – сили тертя – не порушує загального балансу теплоти.

Таким чином, у відповідності з першим законом термодинаміки рівняння енергії для стаціонарного потоку газу в розширеному вигляді можемо записати так:

$$du + pdv = dq = di + \frac{dw^2}{2} + g dz + da_{\text{техн}} + da_{\text{тер}}, \quad (23)$$

де  $da_{\text{техн}}$  – технічна робота (наприклад, робота під час стискання газу в компресорі).

Надану теплоту  $dq$  можна розподілити на зовнішню  $dq_3$  (виникає внаслідок теплообміну з навколишнім середовищем через стінку свердловини) та внутрішню  $dq_{\text{вн}}$  (виникає внаслідок нагрівання газу під час роботи сил тертя):

$$dq = dq_3 + dq_{\text{вн}}. \quad (24)$$

Під час руху газу  $da_{\text{тер}} = dq_{\text{тер}} = dq_{\text{вн}}$ . Робота, яка витрачається на переміщення потоку  $d(pv)$ , на зміну його зовнішньої кінетичної  $\frac{dw^2}{2}$  та зовнішньої потенціальної  $g dz$  енергій, на пе-

ремагання сил тертя  $da_{\text{тер}}$ , і технічна робота  $da_{\text{техн}}$ , здійснюються за рахунок роботи розширення газу  $pdv$ . За малих змін швидкості газу

$\frac{dw^2}{2} \approx 0$ , а у свердловині газ не здійснює технічної роботи ( $da_{\text{техн}} = 0$ ). За цих умов із рівняння енергії потоку газу (23) маємо:

$$dq_3 = di + g dz. \quad (25)$$

Оскільки ентальпія  $i$  є функцією двох змінних ( $p, T$ ), то її повний диференціал

$$di = \left(\frac{\partial i}{\partial T}\right)_p dT + \left(\frac{\partial i}{\partial p}\right)_T dp. \quad (26)$$

Підставляючи це рівняння у (25) і вважаючи, що  $dq_3 = c_x dT$ , записуємо

$$c_x dT = \left(\frac{\partial i}{\partial T}\right)_p dT + \left(\frac{\partial i}{\partial p}\right)_T dp + g dz, \quad (27)$$

звідки

$$c_x = \left(\frac{\partial i}{\partial T}\right)_p + \left(\frac{\partial i}{\partial p}\right)_T \frac{dp}{dT} + g \frac{dz}{dT}, \quad (28)$$

де  $c_x$  – питома теплоємність газу при постійній значині будь-якого параметра системи.

У цьому рівнянні похідна  $dp/dT$  визначає процес зміни стану газу.

В ізобарному процесі  $p = \text{const}$ ,  $dp = 0$ , а із (28) за  $dz/dT = 0$  питома теплоємність

$$c_x = \left(\frac{\partial i}{\partial T}\right)_p, \quad (29)$$

тобто вона рівна питомій теплоємності за сталого тиску в Дж/(кг·К)

$$c_p = \left(\frac{\partial i}{\partial T}\right)_p. \quad (30)$$

В ізентальпійному процесі  $di = 0$ , отже із (26) маємо:

$$\left(\frac{\partial i}{\partial T}\right)_p dT + \left(\frac{\partial i}{\partial p}\right)_T dp = 0, \quad (31)$$

звідки

$$\left(\frac{\partial i}{\partial p}\right)_T = -\left(\frac{\partial i}{\partial T}\right)_p \left(\frac{dp}{dT}\right)_i = -c_p \left(\frac{dp}{dT}\right)_i = c_p \varepsilon_i, \quad (32)$$

де  $\varepsilon_i = -dT/dp$  – коефіцієнт дросельного процесу (коефіцієнт Джоуля-Томсона), К/Па.

Тоді рівняння енергії потоку газу (25) набуває вигляду:

$$dq_3 = c_p dT - c_p \varepsilon_i dp + g dz. \quad (33)$$

Для оцінки процесу теплообміну газу у свердловині з навколишнім середовищем (гірськими породами) розглянемо елемент стовбура свердловини з одиничною висотою.

За законом теплопровідності Фур'є тепловий потік  $q_3$ , Вт/м<sup>2</sup> за одиницю часу через поверхню  $F$  становить [4]:

$$q_3 = -\lambda_T \frac{\partial T}{\partial r} F \quad (34)$$

або

$$q_3 = -2\pi\lambda_T r \frac{\partial T}{\partial r}, \quad (35)$$

де  $\lambda_T$  – коефіцієнт теплопровідності навколишнього середовища (обсадних труб, цементного каменю і гірських порід), Дж/(м·с·К) або Вт/(м·К);

$-\frac{\partial T}{\partial r}$  – градієнт температури  $T$  вздовж полярної (циліндричної) координати  $r$  на деякій глибині  $z$  (знак мінус вказує, що прирости температури і координати протилежні), К/м;

$F$  – площа бокової поверхні з одиничною висотою,  $F = 2\pi r \cdot 1, m^2$ .

Таке теплопровідне перенесення теплоти зумовлює зміну внутрішньої енергії  $U_H$ , Дж навколишнього середовища. Ця енергія для її елемента  $V$  рівна:

$$U_H = cTV, \quad (36)$$

де  $c$  – об'ємна теплоємність навколишнього середовища, Дж/(м<sup>3</sup>·К);

$V$  – об'єм елемента, висота якого дорівнює одиниці,  $V = 2\pi r \cdot 1$ .

Зміна теплоти теплопровідного потоку на довжині  $dr$  становить:

$$q_3(r) - \left[ q_3(r) + \frac{\partial q_3}{\partial r} dr \right] = \frac{\partial q_3}{\partial r} dr = -\frac{\partial}{\partial r} \left[ -\lambda_T \frac{\partial T}{\partial r} \cdot 2\pi r \right] dr = 2\pi\lambda_T \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) dr. \quad (37)$$

Зміну внутрішньої енергії за одиницю часу  $t$ ,  $c$  записуємо так:

$$\frac{\partial U_H}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} (cT \cdot 2\pi r dr) = 2\pi c r dr \frac{\partial T}{\partial t}. \quad (38)$$

Прирівнюючи ці зміни, одержуємо диференціальне рівняння теплопровідного потоку в навколишньому середовищі:

$$2\pi\lambda_T \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) dr = 2\pi c r dr \frac{\partial T}{\partial t} \quad (39)$$

або після спрощення

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{1}{\chi_T} \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (40)$$

де  $\chi_T$  – коефіцієнт температуропровідності навколишнього середовища,  $\chi_T = \lambda_T / c$ , м<sup>2</sup>/с.

Це рівняння за формою запису збігається з відповідним диференціальним рівнянням пружного режиму фільтрації для плоскорадіального потоку [3]. Якщо взяти умови:

$$T(r, 0) = T'_n = \text{const}; \quad (41)$$

$$T(r_c, t) = T' = \text{const}, \quad (42)$$

причому  $T' > T'_n$ ,  $T' - T'_n = \Delta T = \text{const}$ , то, як відомо з курсу підземної гідрогазомеханіки [3], за формальним розв'язком Е. Б. Чекалюка можемо записати розв'язок одержаного рівняння так:

$$T(r, t) = T' - \frac{\Delta T}{\ln \frac{R(t)}{r_c}} \ln \frac{r}{r_c}, \quad (43)$$

де  $T'_n$  – геотермальна температура гірських порід на глибині  $z$ , К;

$T'$  – температура газу у свердловині на цій же глибині, К;

$$\Delta T = \Delta T(z), \text{ К};$$

$R(t)$  – радіус зони збурення температури порід (або поширення теплоти),

$$R(t) = r_c + \sqrt{\pi\chi_T t}, \text{ м};$$

$r_c$  – радіус свердловини, м.

Тут нехтуємо тим, що переріз похилої свердловини є еліпсом. У разі необхідності радіуси можна записати як півсуми півосей відповідних еліпсів [3].

Після диференціювання одержуємо градієнт температури в навколишньому середовищі:

$$\frac{\partial T}{\partial r} = \frac{\Delta T(z)}{\ln \frac{R(t)}{r_c}} \frac{1}{r}. \quad (44)$$

Підставляючи останній вираз у закон Фур'є, отримуємо тепловий потік у навколишнє середовище:

$$q_3 = \frac{2\pi\lambda_T \Delta T(z)}{\ln \left[ 1 + \sqrt{\frac{\pi\chi_T t}{r_c^2}} \right]}. \quad (45)$$

У розрахунку не на одиницю висоти стовбура свердловини, а на елемент стовбура свердловини висотою  $dz$  цей вираз записуємо так:

$$dq_3 = \frac{2\pi\lambda_T \Delta T(z)}{\ln \left[ 1 + \sqrt{\frac{\pi\chi_T t}{r_c^2}} \right]} dz \quad (46)$$

або

$$dq_3 = \pi\lambda_T K(t) \Delta T(z) dz, \quad (47)$$

де

$$K(t) = \frac{2}{\ln \left[ 1 + \sqrt{\frac{\pi\chi_T t}{r_c^2}} \right]}. \quad (48)$$

Віддачу теплоти від газу в навколишнє середовище за одиницю часу (у Вт) можна також описати законом теплопередачі Ньютона-Ріхмана:

$$dq_3 = \lambda' \Delta T(z) \pi D dz, \quad (49)$$

де  $\lambda'$  – повний коефіцієнт тепловіддачі від газу в навколишнє середовище, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$$\Delta T = T' - T_3;$$

$T'$  – температура висхідного потоку газу, К;

$T_3$  – температура зовнішньої стінки свердловини, К;

$D$  – зовнішній діаметр свердловини, м;

$\pi D dz$  – елементарна поверхня теплопередачі, м<sup>2</sup>.

Зіставляючи два останні вирази для  $dq_3$ , отримаємо відповідність:

$$\lambda_T K(t) \sim \lambda' D. \quad (50)$$

Тоді тепловий потік у навколишнє середовище можна записати так:

$$dq_3 = k' \Delta T(z) dz, \quad (51)$$

де  $k' = \pi \lambda_{\tau} K(t)$  або  $k' = \pi \lambda' D$ .

Отже, рівняння енергії з розрахунку на одиницю маси газу набуває вигляду:

$$\frac{k'}{G} \Delta T(z) dz = c_p dT - c_p \varepsilon_i dp + g dz \quad (52)$$

або

$$\frac{k' \cos \alpha_3 \Delta T(z)}{G} = c_p \frac{dT}{dx} - c_p \varepsilon_i \frac{dp}{dx} + g \cos \alpha_3. \quad (53)$$

Значина перепаду температури  $\Delta T(z)$  змінюється вздовж стовбура свердловини з двох причин: у результаті зміни температури теплоносія (газу)  $T'$  і зміни температури гірських порід  $T''$ .

Зміну температури гірських порід записуємо згідно з рівнянням геотерми:

$$T'' = T''_n(z) = T_{пл} - \Gamma_{\tau} z, \quad (54)$$

де  $T_{пл}$  – геотермічна (пластова) температура газового пласта, К;

$\Gamma_{\tau}$  – геотермічний градієнт, К/м;

$z$  – вертикальна координата, що відраховується тут від вибою свердловини, м.

Під час фільтрації газу в газовому пласті температура елемента (точки), який переміщається в пористому середовищі за течією зі швидкістю конвективного перенесення теплоти, змінюється за рахунок дросельного та адіабатичного ефектів. Е. Б. Чекалюк [9] показав, що температурний ефект адіабатичного розширення метану (основний компонент газу) в пласті може в реальних умовах сягати 0,13-0,15 К/МПа. Це становить невелику частку від температурного ефекту Джоуля-Томсона, тобто приблизно 4% для метану за рівних перепадів тиску в часі і по шляху конвективного перенесення теплоти, а тому адіабатичним ефектом у привибійній зоні свердловини можна знехтувати.

Е. Б. Чекалюк, нехтуючи адіабатичним ефектом, отримав залежність між вибійною температурою  $T_v$  і розподілом пластових тисків  $p$  у вигляді [9]:

$$\Delta T_{\varepsilon}(t) = -\bar{\varepsilon}_{iv} [\Delta p_v(t) - \Delta p_v(r_i, t)], \quad (55)$$

де  $\Delta T_{\varepsilon}(t)$  – зниження температури газу на вибої свердловини в часі  $t$ , с за рахунок дросельного ефекту, К;

$\bar{\varepsilon}_{iv}$  – коефіцієнт Джоуля-Томсона, К/Па;

$\Delta p_v(t)$  – зниження тиску на вибої свердловини, Па;

$\Delta p_v(r_i, t)$  – зниження тиску на відстані  $r_i$  від свердловини, Па;

$r_i$  – радіус зондування пласта (радіус конвективного перенесення теплоти за час  $t$ ), м, причому

$$r_i \approx \sqrt{r_c^2 + \frac{c_p G}{c_{п}} \frac{G}{\pi h} t}; \quad (56)$$

$r_c$  – радіус свердловини, м;

$h$  – товщина пласта, м; індекс „в” позначає вибій свердловини.

Навколо центральної газової свердловини, яка розкриває усю товщину однорідного циліндричного (кругового) пласта і працює з постійним масовим дебітом газу  $G$ , утворюється лійка депресії тиску, котра за справедливості лінійного закону Дарсі для ідеального газу описується формулою [3]:

$$p(r, t) \approx \sqrt{p_v^2(t) + \frac{\mu Q_0 p_0}{\pi k h} \ln \frac{r}{r_c}}, \quad (57)$$

де  $p(r, t)$  – тиск газу в пласті на відстані  $r$  від свердловини, Па;

$p_v(t)$  – вибійний тиск, Па;

$\mu$  – динамічний коефіцієнт в'язкості газу, Па·с;

$Q_0$  – об'ємна витрата газу, м<sup>3</sup>/с;

$k$  – коефіцієнт проникності пласта, м<sup>2</sup>.

Оскільки

$$p_v(t) - \Delta p(r_i, t) = [p_{пл} - p_v(t)] - [p_{пл} - p(r_i, t)] = p(r_i, t) - p_v(t),$$

то із (57) після використання формули скороченого множення маємо

$$[p(r, t) - p_v(t)][p(r, t) + p_v(t)] = \frac{\mu Q_0 p_0}{\pi k h} \ln \frac{r}{r_c}, \quad (58)$$

тоді зниження вибійної температури за рахунок дросельного ефекту із урахуванням (56) отримуємо у вигляді:

$$\Delta T_{\varepsilon}(t) = \bar{\varepsilon}_i \frac{\mu Q_0 p_0}{\pi k h [p(r_i, t) + p_v(t)]} \ln \left[ 1 + \frac{c_p G t}{c_{п} \pi h r_c^2} \right]. \quad (59)$$

Із формули дебіту ідеального газу за умови справедливості закону Дарсі [3] з урахуванням формули скороченого множення для різниці квадратів двох чисел маємо:

$$\frac{\mu Q_0 p_0}{\pi k h} = \frac{(p_k + p_v)(p_k - p_v)}{\ln \frac{R_k}{r_c}}. \quad (60)$$

Тоді наближено за  $p(r_i, t) \approx p_{пл}$ , що є повністю допустимим у разі фільтрації газу [3], знаходимо:

$$\Delta T_{\varepsilon}(t) = \bar{\varepsilon}_i (p_{пл} - p_v) \frac{\ln \left( 1 + \frac{c_p G t}{c_{п} \pi h r_c^2} \right)}{\ln \frac{R_k}{r_c}}, \quad (61)$$

де  $p_{пл}$  – пластовий тиск, Па.

Отже, перепад температури

$$\Delta T(z) = T - T'_n - \Delta T_v(t) = T - T_{пл} + \Gamma_{\tau} z - \Delta T_{\varepsilon}. \quad (62)$$

Тоді рівняння енергії для потоку газу записуємо так:

$$\frac{k'}{G} (T - T_{пл} + \Gamma_{\tau} z - \Delta T_{\varepsilon}) dz = c_p dT - c_p \varepsilon_i dT + g dz. \quad (63)$$

Таким чином, зміни тиску і температури газу вздовж стовбура похилої газової свердловини описуються наступною системою двох рівнянь:

$$\cos \alpha_3 dx + \frac{dp}{\rho_r g} + \lambda \frac{w^2}{2g} dx = 0; \quad (64)$$

$$\frac{k' \cos \alpha_3}{G} (T - T_{пл} + \Gamma_T x \cos \alpha_3 - \Delta T_\varepsilon) = \\ = c_p \frac{dT}{dx} - c_p \varepsilon_i \frac{dp}{dx} + g \cos \alpha_3. \quad (65)$$

Зводимо систему рівнянь (64) і (65) до зручного для інтегрування вигляду. Оскільки із рівняння нерозривності потоку маємо:

$$\rho_r w = \rho_{r0} w_0, \quad (66)$$

то швидкість руху газу становитиме

$$w = w_0 \frac{\rho_{r0}}{\rho_r}, \quad (67)$$

де  $w_0$  – швидкість руху газу за стандартних умов, м/с.

Вводимо число Фруда

$$Fr = \frac{w_0^2}{2gd} \quad (68)$$

і перетворюємо рівняння руху газу (64) до вигляду:

$$-\frac{dp}{dx} = \rho_r g \cos \alpha_3 \left( 1 + \frac{\lambda Fr \rho_{r0}^2}{\rho_r^2 \cos \alpha_3} \right). \quad (69)$$

Замінивши густину газу  $\rho_r$  із рівняння стану, після перетворення отримуємо рівняння руху у вигляді:

$$-\frac{p}{p^2 + \lambda \frac{Fr p_0^2}{\cos \alpha_3} \left( \frac{z_r T}{T_0} \right)} \frac{dp}{dx} = \frac{T_0}{z_r T} \frac{\rho_{r0} g \cos \alpha_3}{p_0}. \quad (70)$$

У рівнянні енергії газу (65) вводимо нову змінну

$$N = T - T_{пл} + \Gamma_T x \cos \alpha_3 - \Delta T_\varepsilon, \quad (71)$$

звідки

$$\frac{dT}{dx} = \frac{dN}{dx} - \Gamma_T \cos \alpha_3, \quad (72)$$

і позначаємо

$$\frac{k' l \cos \alpha_3}{G c_p} = \varphi, \quad (73)$$

де  $l$  – довжина ділянки стовбура свердловини, м.

Тоді рівняння енергії газу (65) зводиться до вигляду:

$$\frac{dN}{dx} + \frac{\varphi}{l} N = \varepsilon_i \frac{dp}{dx} + \left( \Gamma_T - \frac{g}{c_p} \right) \cos \alpha_3. \quad (74)$$

Отримана система рівнянь руху (70) і енергії газу (74) не має аналітичного розв'язку. Під час висхідного руху газу у свердловині тиск і температура (відповідно і функція  $N$ ) змінюються, їх зміна супроводжується змінами параметрів газу (коефіцієнта стисливості  $z_r$ , коефіцієнта Джоуля-Томсона  $\varepsilon_i$ , коефіцієнта гідравлічного опору  $\lambda$ , питомої теплоємності газу  $c_p$ ). Тому цими рівняннями можна послуговуватися тільки для елементарної (малої) довжини стовбура свердловини, в межах якої параметри газу

припустимо вважати незмінними, постійними. Задача полягає у визначенні тиску і температури на гирлі свердловини і їх розподілу вздовж стовбура. Тоді замість інтегрування цих рівнянь пропонуємо зводити обчислення до визначення змін тиску  $\Delta p$  і температури  $\Delta T$  на окремих ділянках  $\Delta l_i$ , на які слід поділити усю довжину  $L$  стовбура свердловини. Таким чином, отримуємо тиск і температуру:

$$p_2 = p_1 - \sum_{i=1}^n \Delta p_i; \quad (75)$$

$$T_2 = T_1 - \sum_{i=1}^n \Delta T_i, \quad (76)$$

де  $p_1$  і  $p_2$ ,  $T_1$  і  $T_2$  – тиски і температури відповідно на початку і на кінці розглядуваної ділянки;  $p$  – кількість ділянок (кроків) зміни довжини на загальній довжині  $L$ . Відмітимо, чим більшим буде  $n$ , тим точніший отримаємо результат розрахунку.

Граничні умови – це тиск  $p_b$  і температура  $T_b$  на вибої свердловини. Тиск  $p_b$  визначається за рівнянням припливу газу до свердловини залежно від масового дебіту  $G$ , причому

$$G = Q_0 \rho_{r0}, \quad (77)$$

де  $Q_0$  – об'ємний дебіт за стандартних умов, м<sup>3</sup>/с, а температура

$$T_b = T_{пл} - \Delta T_\varepsilon. \quad (78)$$

Поступаємо так. Припускаючи температуру на довжині ділянки  $\Delta l_i$ , постійною і рівною температурі на початку її (для першої ділянки  $T = T_i = T_b$ ), інтегруванням рівняння руху в межах від нуля до  $l_i$ , отримуємо:

$$\frac{p_1^2 + \lambda \frac{Fr p_0^2}{\cos \alpha_3} \left( \frac{z_r T}{T_0} \right)^2}{p_2^2 + \lambda \frac{Fr p_0^2}{\cos \alpha_3} \left( \frac{z_r T}{T_0} \right)^2} = \exp \left( \frac{T_0}{z_r T} \frac{2l_i \rho_{r0} g \cos \alpha_3}{p_0} \right), \quad (79)$$

звідки тиск  $p_2$  на кінці ділянки за відомого тиску  $p_1$  на початку її (для першої ділянки  $p_1 = p_b$ )

$$p_2 = \left\{ p_1^2 - \left[ p_1^2 + \lambda \frac{Fr p_0^2}{\cos \alpha_3} \left( \frac{z_r T}{T_0} \right)^2 \right] \times \right. \quad (80)$$

$$\left. \left[ 1 - \exp \left( - \frac{T_0}{z_r T} \frac{2l_i \rho_{r0} g \cos \alpha_3}{p_0} \right) \right] \right\}^{1/2},$$

а тоді

$$\frac{dp}{dx} \approx - \frac{p_1 - p_2}{l_i} = - \frac{\Delta p_i}{l_i}. \quad (81)$$

У рівнянні енергії (74) позначаємо

$$- \varepsilon_i \frac{\Delta p_i}{l_i} + \left( \Gamma_T - \frac{g}{c_p} \right) \cos \alpha_3 = \psi, \quad (82)$$

а тоді отримуємо

$$\frac{dN}{dx} + \frac{\varphi}{l_i} N = \psi, \quad (83)$$

звідки, інтегруючи по  $N$  від  $N_1$  до  $N_2$  і по  $x$  від 0 до  $l_i$ , знаходимо

$$N_2 = N_1 \exp(-\varphi) + \frac{\Psi l_i}{\varphi} [1 - \exp(-\varphi)] \quad (84)$$

а відтак із (71) – температуру газу на кінці ділянки  $T_2$  за відомої температури на її початку.

При інтегруванні припускали, що  $\lambda$ ,  $z_r$ ,  $c_p$ ,  $\varepsilon_i$  є постійними величинами і визначаються залежно від  $p_1$  і  $T_1$ .

Оскільки вздовж стовбура свердловини можуть бути вертикальні і горизонтальні ділянки, то для вертикальних ділянок слід взяти  $\alpha_3 = 0$ ,  $\cos \alpha_3 = 1$ . Для горизонтальних ділянок свердловини і горизонтальних газопроводів  $\alpha_3 = \pi/2$ ,  $\cos \alpha_3 = 0$ . У формулах величину  $k'$  слід записати у вигляді:

$$k' = \pi \lambda' D. \quad (85)$$

Для горизонтальних трубопроводів добуток множників у правій частині рівняння (80) набуває невизначеності. Розкриваючи невизначеність  $\infty \cdot 0$ , отримуємо:

$$p_2 = \sqrt{p_1^2 - \lambda Fr p_0 \frac{z_r T}{T_0} \cdot 2 l_i \rho_{r0} g}. \quad (86)$$

Так як для горизонтальних трубопроводів  $N = T - T_3$ ;  $T_3 = \text{const}$ ,  $\Delta T_e = 0$ ,  $\alpha_3 = \pi/2$ ,

$\cos \alpha_3 = 1$ ,  $N_1 = T_1 - T_3$ , то  $\Psi = -\varepsilon_i \frac{\Delta p_i}{l_i}$  або  $\Psi l_i = -\varepsilon_i \Delta p_i$ , рівняння (83) набуває вигляду:

$$T_1 = T_3 + (T_1 - T_3) \exp(-\varphi) - \frac{\varepsilon_i \Delta p}{\varphi} [1 - \exp(-\varphi)]. \quad (87)$$

Коефіцієнт гідравлічного опору  $\lambda$  залежить від режиму руху газу, тобто від числа Рейнольдса

$$Re = \frac{w d \rho_r}{\mu_r} = \frac{w_0 \rho_{r0} d}{\mu_r}, \quad (88)$$

де  $\mu_r$  – динамічний коефіцієнт в'язкості газу,

$$\mu_r = \mu_r(p_1, T_1).$$

Коефіцієнт стисливості газу  $z_r(p_1, T_1)$ , коефіцієнт Джоуля-Томпсона  $\varepsilon_i(p_1, T_1)$ , питома теплоємність газу  $c_p(p_1, T_1)$  є функціями тиску і температури (тут вони записані залежно від тиску  $p_1$  і температури  $T_1$  на початку першої ділянки) [2].

Розрахунки повторюємо на кожній ділянці зміни довжини, в результаті отримуємо розподіли тиску і температури вздовж стовбура та шукані тиск і температуру на гирлі свердловини, або відповідно на вибої свердловини.

Таким чином, із отриманої системи рівнянь руху та енергії газу з урахуванням теплоти, що виділяється внаслідок газомеханічного тертя, після розділення потоку на елементарні ділянки визначаються тиск і температура газу в будь-якій точці стовбура свердловини (чи похило прокладеного газопроводу), у т.ч. на її кінцях (на гирлі або вибої), тобто визначаються розподіли тиску і температури вздовж напрямку газового потоку.

## Висновки

В основу запропонованого методу покладено рівняння нерозривності потоку руху в диференціальній формі за формулою Дарсі-Вейсбаха, енергії і стану реального газу за узагальненим законом Клайперона-Менделєєва. Рівняння енергії виведено в роботі згідно з першим початком (законом) термодинаміки. Враховано підвищення температури газу за рахунок газомеханічного тертя, зміну внутрішньої енергії потоку в результаті теплопровідності в радіальному і вертикальному напрямках. У підсумку отримано систему з двох диференціальних рівнянь, котрі описують взаємозв'язок тиску і температури потоку реального газу вздовж вертикальної чи похило спрямованої газової свердловини або похило прокладеного газопроводу. Обчислення запропоновано виконувати шляхом поділу довжини потоку на окремі ділянки, в межах кожної із яких параметри газу є постійними, але залежними від тиску і температури.

## Література

- 1 Ржевський С. В. Дослідження операцій / С. В. Ржевський, В. М. Александрова. – Київ : Академвидав, 2006. – 560 с.
- 2 Бойко В. С. Проектування експлуатації нафтових свердловин : підручник / В. С. Бойко; Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. – Івано-Франківськ : Нова Зоря, 2011. – 784 с.
- 3 Бойко В. С. Підземна гідрогазомеханіка: підручник / В. С. Бойко, Р. В. Бойко. – Львів : Апріорі, 2005. – 452 с.
- 4 Довідник з нафтогазової справи / За ред. В. С. Бойка, Р. М. Кондрата, Р. С. Яремійчука. – Київ-Львів, 1996. – 620 с.
- 5 Трофимова Т. И. Курс фізики / Т. И. Трофимова. – Москва : Высшая школа, 1999. – 478 с.
- 6 Инструкция по комплексному исследованию газовых и газоконденсатных пластов и скважин / Под ред. Г. А. Зотова, З. С. Алиева. – Москва : Недра, 1980. – 301 с.
- 7 Ковалко М. П. Трубопровідний транспорт газу / М. П. Ковалко, В. Я. Грудз, В. Б. Михайлів та ін. – Київ : АРЕНАеко, 2002. – 600 с.
- 8 Чарный И. А. Основы газовой динамики / И. А. Чарный. – Москва : Гостоптехиздат, 1961. – 200 с.
- 9 Чекалюк Э. Б. Термодинамика нефтяного пласта / Э. Б. Чекалюк. – Москва : Недра, 1965. – 240 с.

Стаття надійшла до редакційної колегії  
23.11.16

Рекомендована до друку  
професором **Тарком Я.Б.**  
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)  
професором **Світлицьким В.М.**  
(ТОВ «Нафтогазовий центр», м. Київ)

## ДОСЛІДЖЕННЯ КІНЕМАТИКИ І ДИНАМІКИ ВАЖІЛЬНОГО МЕХАНІЗМУ ПРИВОДА ВЕРСТАТА-ГОЙДАЛКИ

<sup>1</sup>В. М. Сенчішак, <sup>1</sup>В. Я. Попович, <sup>2</sup>О. В. Прозур

<sup>1</sup>ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 727147,  
e-mail: [meshtsch@iifn.org.edu.ua](mailto:meshtsch@iifn.org.edu.ua)

<sup>2</sup>Нафтогазовидобувне управління "Чернігівнафтогаз";  
17500, Чернігівська обл., м. Прилуки, вул. Вокзальна, 1, тел. (04637) 32198,  
e-mail: [Olexandr.prozur@prngdy.ukrnafta.com](mailto:Olexandr.prozur@prngdy.ukrnafta.com)

Під час роботи верстата-гойдалки між рухомими з'єднаннями ланок (кінематичних пар) виникають сили взаємодії (сили реакцій). Навантаження кінематичних пар цими силами є важливою динамічною характеристикою механізму. Дослідження реакції у кінематичних парах механізму, які знаходяться в експлуатації, необхідні для аналізування різноманітних механічних поломок ланок і вузлів механізму.

У роботі розглянуто кінематичні і кінетостатичні дослідження важільного механізму привода верстата-гойдалки з надлишковими зв'язками і без надлишкових зв'язків. Кінетостатичні дослідження проводились для механізму привода верстата-гойдалки моделі 7СК12-2,5-5600 з реальним навантаженням, взятим із динамограми.

Проведеними дослідженнями встановлено вплив надлишкових зв'язків на навантаженість ланок механізму привода.

Ключові слова: векторний контур, розрахункова схема, кінематична пара, ланка, надлишкові зв'язки, реакції зв'язків.

При работе станка-качалки между подвижными соединениями звеньев (кинематических пар) возникают силы взаимодействия (силы реакций). Нагрузка кинематических пар этими силами является важной динамической характеристикой механизма. Исследование реакции в кинематических парах механизма, которые находятся в эксплуатации, необходимо для проведения анализа различных механических поломок звеньев и узлов механизма.

В работе рассмотрены кинематические и кинетостатические исследования рычажного механизма привода станка-качалки с избыточными связями и без избыточных связей. Кинетостатические исследования проводились для механизма привода станка-качалки модели 7СК12-2,5-5600 с реальной нагрузкой, взятой из динамограммы.

Проведенными исследованиями установлено влияние избыточных связей на загруженность звеньев механизма привода.

Ключевые слова: векторный контур, расчетная схема, кинематическая пара, звено, избыточные связи, реакции связей.

In the process of the pumping jack operation in the movable connections (kinematic pairs), the component interacting forces emerge (reaction forces). The load of the kinematic pairs with these forces is considered to be an important dynamic characteristic of a mechanism. The research of the reaction in the mechanism kinematic pairs is necessary for the analysis of various mechanical failures of the machine components.

The article deals with the kinematic and kinetostatic research of a pumping jack driving mechanism with and without excessive connections. The kinetostatic research has been conducted for the pumping jack driving mechanism of the 7SK12-2,5-5600 model with a real load taken from the dynamogram.

The conducted research has discovered the influence of the excessive connections on the driving mechanism components workload.

Key words: vector circuit, design model, kinematic pair, component, excessive connections, connections reaction.

**Вступ.** Важливим вузлом штангової глибинонасосної установки є привод, який надає за допомогою штанг зворотно-поступального руху плунжеру глибинного насоса, що знаходиться у свердловині. Із різних видів приводів штангових насосів у нафтовидобувній галузі найчастіше застосовується балансірний привод механічної дії, який на практиці називають верстатом-гойдалкою.

Під час роботи верстата-гойдалки на ланки діють зовнішні активні сили, а в кінематичних з'єднаннях виникають сили взаємодії ланок між собою (сили реакцій). Вони відносяться до внутрішніх сил по відношенню до механізму загалом.

Ці сили є швидкозмінними, вони приймають інші значення, ніж у стані спокою. Навантаження кінематичних пар цими силами є важливою динамічною характеристикою механізму. Знання про сили у кінематичних парах механізмів, які знаходяться в експлуатації, необхідне для проведення аналізу різноманітних механічних поломок ланок і вузлів механізму.

**Аналіз сучасних досліджень.** Розрахунки просторового механізму верстата-гойдалки, положення його ланок у просторі, кінематичних і кінетостатичних характеристик пов'язані з виконанням великого об'єму громіздких ана-

літичних обчислень. Тому у багатьох роботах автори спрощують важільний механізм, зображуючи його плоским. Так, у роботах [1, 2] автори розглядали просторовий шестиланковий важільний механізм привода верстата-гойдалки дещо спрощено – як плоский чотириланковий. Такий підхід є достатньо коректним тільки для випадку дослідження кінематичних параметрів точки підвісу колони штанг.

**Виділення невіршених раніше частин загальної проблеми.** Якщо ж досліджувати переміщення ланок механізму у просторі або величину навантажень на кожну ланку важільного механізму, то такий підхід є помилковим. При такій постановці задачі неможливо врахувати реальний перерозподіл сил між ланками просторового механізму від зовнішнього навантаження і вплив локальних зазорів в окремих з'єднаннях, які з'являються у процесі зношування, на положення ланок у просторі.

**Метою роботи** є кінематичні і кінетостатичні дослідження просторового важільного механізму привода верстата-гойдалки.

**Висвітлення основного матеріалу досліджень.** На рис. 1 зображено кінематичну схему кривошипно-коромислового механізму привода верстата-гойдалки, який складається із здвоєного кривошипа 1, двох шатунів 2 і 3, траверси 4 і балансира 5. Шатуни з'єднані з кривошипом і траверсою кінематичними обертальними парами V класу (шарніри  $A, B, A_1, B_1$ ). Балансир з траверсою з'єднаний сферичною парою  $D$  III класу, а з стояком – V класу (шарнір  $C$ ).

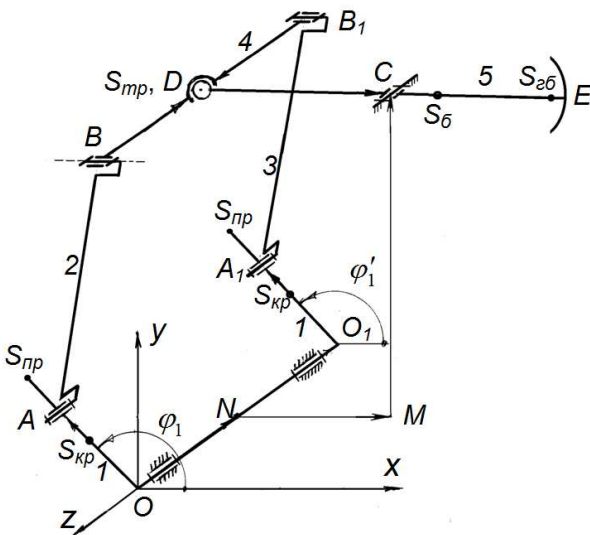


Рисунок 1 – Кінематична схема верстата-гойдалки

Положення ланок у просторі у зазначений момент часу будуть визначати напрямні косинуси орт  $x_i, y_i, z_i$  відповідних векторів  $\bar{l}_i$ , які умовно замінюють ланки механізму, а положення гілок кривошипа - кути  $\varphi_1$  і  $\varphi'_1$ .

В роботі [3] розв'язана перша задача кінематики – дослідження положень ланок просторового шестиланкового важільного механізму привода верстата-гойдалки методом векторних замкнених контурів [4] засобами векторної алгебри. У замкнених кінематичних ланцюгах ланки, з'єднуючись між собою, утворюють замкнені контури. На схемі механізму (рис. 1) це контури  $OABDCMNO$  та  $NO_1A_1B_1DCMN$ .

Умова їх замкнутості описується рівняннями

$$\bar{l}_{OA} + \bar{l}_{AB} + \bar{l}_{BD} + \bar{l}_{DC} = \bar{l}_{ON} + \bar{l}_{NM} + \bar{l}_{MC}, \quad (1)$$

$$\bar{l}_{NO_1} + \bar{l}_{O_1A_1} + \bar{l}_{A_1B_1} + \bar{l}_{B_1D} + \bar{l}_{DC} = \bar{l}_{NM} + \bar{l}_{MC}. \quad (2)$$

Рівняння (1), (2) перепишемо у такому вигляді:

$$l_{OA}\bar{e}_{OA} + l_{AB}\bar{e}_{AB} + l_{BD}\bar{e}_{BD} + l_{DC}\bar{e}_{DC} = l_{ON}\bar{e}_{ON} + l_{NM}\bar{e}_{NM} + l_{MC}\bar{e}_{MC}; \quad (3)$$

$$l_{NO_1}\bar{e}_{NO_1} + l_{O_1A_1}\bar{e}_{O_1A_1} + l_{A_1B_1}\bar{e}_{A_1B_1} + l_{B_1D}\bar{e}_{B_1D} + l_{DC}\bar{e}_{DC} = l_{NM}\bar{e}_{NM} + l_{MC}\bar{e}_{MC}, \quad (4)$$

де  $\bar{e}_i$  – орти відповідних векторів  $\bar{l}_i$ .

Орти є одномірним масивом виду

$$\bar{e}_i = (x_i \quad y_i \quad z_i)^T,$$

де  $x_i, y_i, z_i$  – напрямні косинуси орта відповідно до осей  $x, y, z$ .

З врахуванням векторного запису орт, рухомі ланки механізму зобразимо векторами

$$\bar{l}_2 = l_{AB} \begin{pmatrix} x_{AB} \\ y_{AB} \\ z_{AB} \end{pmatrix}; \quad \bar{l}_3 = l_{A_1B_1} \begin{pmatrix} x_{A_1B_1} \\ y_{A_1B_1} \\ z_{A_1B_1} \end{pmatrix}; \quad \bar{l}_4 = l_{BD} \begin{pmatrix} x_{BD} \\ y_{BD} \\ z_{BD} \end{pmatrix};$$

$$\bar{l}_{41} = -l_{B_1D} \begin{pmatrix} x_{BD} \\ y_{BD} \\ z_{BD} \end{pmatrix}; \quad \bar{l}_5 = l_{DC} \begin{pmatrix} x_{DC} \\ y_{DC} \\ 0 \end{pmatrix};$$

$$\bar{l}_1 = l_{OA} \begin{pmatrix} \cos \varphi_1 \\ \sin \varphi_1 \\ 0 \end{pmatrix}; \quad \bar{l}_{11} = l_{O_1A_1} \begin{pmatrix} \cos \varphi'_1 \\ \sin \varphi'_1 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

де  $\bar{l}_1, \bar{l}_{11}, \bar{l}_2, \bar{l}_3, \bar{l}_4, \bar{l}_{41}, \bar{l}_5$  – лінійні вектори, які умовно зв'язані відповідно з рухомими ланками або з їх елементами  $OA, O_1A_1, AB, A_1B_1, BD, B_1D, DC$ .

Тепер систему рівнянь (1), (2) перепишемо

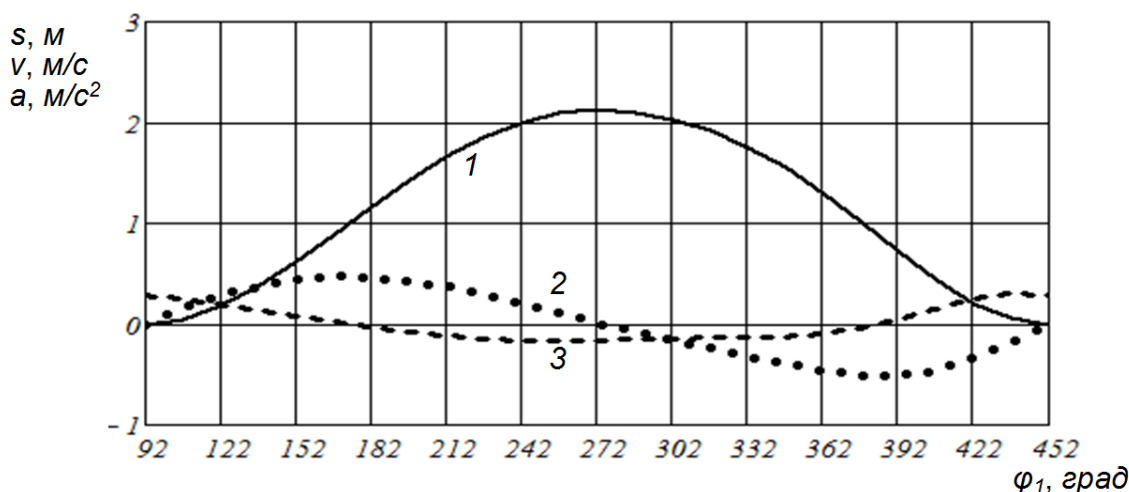
$$\bar{l}_1 + \bar{l}_2 + \bar{l}_4 + \bar{l}_5 = \bar{l}_{ON} + \bar{l}_{NM} + \bar{l}_{MC}, \quad (5)$$

$$\bar{l}_{NO_1} + \bar{l}_{11} + \bar{l}_3 + \bar{l}_{41} + \bar{l}_5 = \bar{l}_{NM} + \bar{l}_{MC}. \quad (6)$$

Диференціюємо за часом рівняння (5), (6)

$$\frac{d\bar{l}_1}{dt} + \frac{d\bar{l}_2}{dt} + \frac{d\bar{l}_4}{dt} + \frac{d\bar{l}_5}{dt} = 0, \quad (7)$$

$$\frac{d\bar{l}_{11}}{dt} + \frac{d\bar{l}_3}{dt} + \frac{d\bar{l}_{41}}{dt} + \frac{d\bar{l}_5}{dt} = 0. \quad (8)$$



1 – переміщення; 2 – швидкість; 3 - прискорення

Рисунок 2 – Кінематика точки підвісу штанг

Похідні за часом від лінійних векторів  $\frac{d\bar{l}_i}{dt}$

знаходимо за формулою Бура [5]

$$\bar{\omega}_1 \times \bar{l}_1 + \bar{\omega}_2 \times \bar{l}_2 + \bar{\omega}_4 \times \bar{l}_4 + \bar{\omega}_5 \times \bar{l}_5 = 0, \quad (9)$$

$$\bar{\omega}_1 \times \bar{l}_{11} + \bar{\omega}_3 \times \bar{l}_3 + \bar{\omega}_4 \times \bar{l}_{41} + \bar{\omega}_5 \times \bar{l}_5 = 0. \quad (10)$$

Тут кутова швидкість кривошипа задана у векторній формі  $\bar{\omega}_1 = (0 \ 0 \ \omega_1)^T \ (c^{-1})$ . Підлягають визначенню кутові швидкості ланок механізму  $\bar{\omega}_2, \bar{\omega}_3, \bar{\omega}_4, \bar{\omega}_5$ .

Щоб знайти кутові прискорення ланок механізму, диференціюємо за часом  $t$  систему рівнянь (9), (10). В результаті отримаємо два векторних рівняння

$$\begin{aligned} \bar{\varepsilon}_1 \times \bar{l}_1 + \bar{\omega}_1 \times (\bar{\omega}_1 \times \bar{l}_1) + \bar{\varepsilon}_2 \times \bar{l}_2 + \bar{\omega}_2 \times (\bar{\omega}_2 \times \bar{l}_2) + \\ + \bar{\varepsilon}_4 \times \bar{l}_4 + \bar{\omega}_4 \times (\bar{\omega}_4 \times \bar{l}_4) + \bar{\varepsilon}_5 \times \bar{l}_5 + \\ + \bar{\omega}_5 \times (\bar{\omega}_5 \times \bar{l}_5) = 0, \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \bar{\varepsilon}_1 \times \bar{l}_{11} + \bar{\omega}_1 \times (\bar{\omega}_1 \times \bar{l}_{11}) + \bar{\varepsilon}_3 \times \bar{l}_3 + \bar{\omega}_3 \times (\bar{\omega}_3 \times \bar{l}_3) + \\ + \bar{\varepsilon}_4 \times \bar{l}_4 + \bar{\omega}_4 \times (\bar{\omega}_4 \times \bar{l}_{41}) + \bar{\varepsilon}_5 \times \bar{l}_5 + \\ + \bar{\omega}_5 \times (\bar{\omega}_5 \times \bar{l}_5) = 0. \end{aligned} \quad (12)$$

де  $\bar{\varepsilon}_1$  – вектор кутового прискорення кривошипа, модуль і напрям якого задається  $\bar{\varepsilon}_1 = (0 \ 0 \ \varepsilon_1)^T$ ;

$\bar{\varepsilon}_2, \bar{\varepsilon}_3, \bar{\varepsilon}_4, \bar{\varepsilon}_5$  – вектори кутових прискорень відповідних ланок механізму, які підлягають визначенню.

Наведені вище системи рівнянь (9)...(12) зручно розв'язувати обчислювальним блоком *Given-Minerr* програмного пакету Mathcad [6]. Коли визначені кутові швидкості і прискорення ланок, легко знайти лінійні швидкості і прискорення будь-яких точок механізму.

Швидкості і прискорення окремих точок ланок механізму привода визначаються за формулами:

- точки  $E$  (точка підвісу штанг)

$$\bar{V}_E = \bar{\omega}_5 \times \bar{l}_{CE},$$

$$\bar{a}_E = \bar{\varepsilon}_5 \times \bar{l}_{CE} + \bar{\omega}_5 \times (\bar{\omega}_5 \times \bar{l}_{CE}); \quad (13)$$

де  $\bar{l}_{CE} = l_{CE} (x_{DC} \ y_{DC} \ 0)^T$ ;

- центра маси траверси

$$\bar{V}_{Smp} = -\bar{\omega}_5 \times \bar{l}_{DC},$$

$$\bar{a}_{Smp} = -\bar{\varepsilon}_5 \times \bar{l}_{DC} - \bar{\omega}_5 \times (\bar{\omega}_5 \times \bar{l}_{DC}); \quad (14)$$

- центра маси головки балансира

$$\bar{V}_{S\delta} = \bar{\omega}_5 \times \bar{l}_{CS\delta},$$

$$\bar{a}_{S\delta} = \bar{\varepsilon}_5 \times \bar{l}_{CS\delta} + \bar{\omega}_5 \times (\bar{\omega}_5 \times \bar{l}_{CS\delta}); \quad (15)$$

- центрів мас противаг

$$\bar{V}_{np} = \bar{\omega}_1 \times \bar{l}_{OSnp},$$

$$\bar{a}_{np} = \bar{\omega}_1 \times \bar{V}_{np} + \bar{\varepsilon}_1 \times \bar{l}_{OSnp}. \quad (16)$$

У формулах (13)...(16)  $\bar{l}_{CS\delta} = CS_{\delta} \begin{pmatrix} x_{DC} \\ y_{DC} \\ z_{DC} \end{pmatrix}$ ,

$$\bar{l}_{CS\delta} = CS_{\delta} \begin{pmatrix} x_{DC} \\ y_{DC} \\ z_{DC} \end{pmatrix}, \quad \bar{l}_{OSnp} = OS_{np} \begin{pmatrix} \cos \varphi_1 \\ \sin \varphi_1 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

На рис. 2 наведено окремі результати кінематичних досліджень механізму привода верстата-гойдалки, а саме переміщення, швидкість і прискорення точки підвісу колони штанг.

Встановлено, що у досліджуваному механізмі присутні чотири пасивні зв'язки. Результати досліджень впливу динамічних похибок на деформацію окремих ланок механізму вказують на те, що пасивні зв'язки присутні у кінематичних парах  $A, A_1$  і  $B, B_1$ . Шатуни 2 і 3 зазнають пружних деформацій кручення і згину [3].

Враховуючи пружні деформації шатунів, складемо розрахункову схему для кінетостатичного розрахунку механізму.

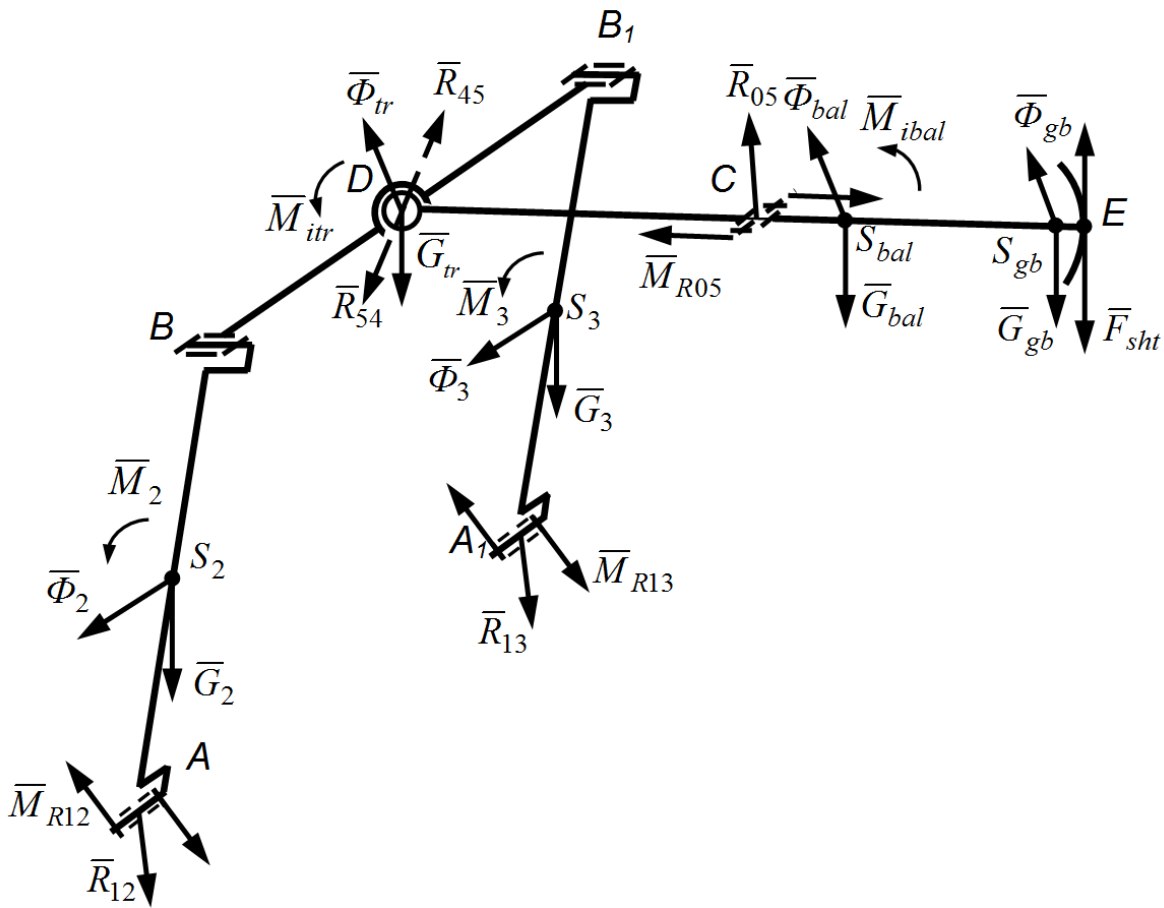


Рисунок 3 – Розрахункова схема для визначення реакцій у кінематичних парах механізму

Реакції у кінематичних парах зводяться до сили і пари сил реакції [7]; сила реакції визначається числом параметрів, рівним числу зв'язків поступальних переміщень, накладених кінематичною парою; момент пари сил реакції визначається числом параметрів, рівним числу зв'язків обертальних переміщень, накладених кінематичною парою. Притому вектор моменту пари сил реакції перпендикулярний до осі шарніра. Якщо кінематична пара допускає обертання навколо трьох осей, то момент пари сил реакції рівний нулю.

Силами тертя нехтуємо. Кінематична пара третього класу (шарнір  $D$ ) не допускає поступальних переміщень одного елемента відносно іншого. Зв'язки можна замінити силою реакції  $\bar{R}_{ji}$ , яка проходить через центр шарніра. Модуль і напрям сили реакції невідомі.

Інші кінематичні пари (шарніри  $A, A_1, B, B_1, C$ ) обертальні V класу. Такі обертальні пари допускають відносно обертання її елементів навколо осі шарніра. Накладені зв'язки можна замінити силою реакції  $\bar{R}_{ji}$ , невідомою за модулем і напрямком, і парою сил реакції  $\bar{M}_{Rji}$ , причому вектор моменту пари перпендикулярний до осі шарніра [7].

З врахуванням вищезгаданого, побудовано розрахункову схему просторового механізму привода верстата-гойдалки (рис. 3), яка складається із чотирьох ланок, що знаходяться під

дією зовнішніх сил (сил ваги ланок  $\bar{G}_2, \bar{G}_3, \bar{G}_4, \bar{G}_5$  і ваги головки балансира  $\bar{G}_{gb}$ ) та реакцій зв'язків  $\bar{R}_i, \bar{M}_{Ri}$ . Сили реакцій і моменти пари сил реакцій у кінематичних парах  $B$  і  $B_1$  на схемі не відображені, оскільки вони взаємно зрівноважені.

У точці підвісу колони штанг (точка  $E$ ) діє сила  $\bar{F}_{sh}$ . Значення цієї сили брались із реальної динамограми роботи верстата-гойдалки моделі 7СК12-2,5-5600. Сила  $\bar{F}_{sh}$  є зведеною силою ваги колони штанг і перекачуваної рідини, сил тертя і сил інерції мас колони і рідини.

Кінетостатичні дослідження побудовані на принципі Даламбера. При русі ланок їх рівновага відсутня, оскільки частина сил витрачається на прискорення або сповільнення мас. Тому формально умову рівноваги при русі записують на підставі принципу Даламбера, додаючи до умови рівноваги сили і моменти сил інерції, які визначаються за формулами:

$$\bar{\Phi}_i = -m_i \bar{a}_{Si}, \quad \bar{M}_{ii} = -\bar{\epsilon}_i J_{Si}.$$

Моменти  $\bar{M}_2, \bar{M}_3$ , які прикладені відповідно до шатунів 2 і 3, є сумарними моментами для кожного із шатунів

$$\begin{aligned} \bar{M}_2 &= \bar{M}_{F2} + \bar{M}_{kp2} + \bar{M}_{i2}, \\ \bar{M}_3 &= \bar{M}_{F3} + \bar{M}_{kp3} + \bar{M}_{i3}, \end{aligned} \quad (17)$$

де  $\bar{M}_{i2}, \bar{M}_{i3}$  – моменти сил інерції шатунів;

$\bar{M}_{kp2}, \bar{M}_{kp3}$  – моменти сил пружного кручення на шатунах 2 і 3.

Напрямок цих моментів будуть визначати відповідно орти  $\bar{e}_{AB}, \bar{e}_{A_1B_1}$  лінійних векторів  $\bar{l}_{AB}$  і  $\bar{l}_{A_1B_1}$ , тобто:

$$\bar{M}_{kp2} = T_{kp} \bar{e}_{AB}, \text{ або } \bar{M}_{kp2} = \frac{GJ_{\rho} \varphi_{\kappa}}{l_{AB}} \bar{e}_{AB}, \quad (18)$$

$$\bar{M}_{kp3} = T_{kp} \bar{e}_{A_1B_1}, \text{ або } \bar{M}_{kp3} = \frac{GJ_{\rho} \varphi_{\kappa}}{l_{AB}} \bar{e}_{A_1B_1}. \quad (19)$$

Деформація згину шатунів у площині  $хоу$  породжує згинальні моменти у шарнірах  $B, B_1$ , величина і напрям яких визначається за формулою:

$$\bar{M}_{F2} = \frac{3EJ_z \sin(\Delta\beta_{23}/2)}{l_{AB}^2} \bar{e}_{BD}, \quad (20)$$

$$\bar{M}_{F3} = -\frac{3EJ_z \sin(\Delta\beta_{23}/2)}{l_{AB}^2} \bar{e}_{BD}, \quad (21)$$

де  $\Delta\beta_{23}$  – кут між шатунами у площині  $хоу$ ;

$E = 2,1 \cdot 10^{11} \text{ МПа}$  – модуль пружності матеріалу шатуна;

$J_z = 1,176 \cdot 10^{-6} \text{ м}^4$  – осьовий момент інерції поперечного перерізу шатуна.

Сили реакцій і моменти сил реакцій у кінематичних парах невідомі і підлягають визначенню.

Для кожної ланки можна записати рівняння рівноваги сил і рівняння рівноваги моментів сил відносно точок, які знаходяться у центрі кінематичних пар.

Запишемо рівновагу сил і моментів сил, які діють на балансир

$$\sum_{л.5} \bar{F}_i = 0, \quad (22)$$

$$\bar{R}_{45} + \bar{G}_{bal} + \bar{\Phi}_{bal} + \bar{G}_{gb} + \bar{\Phi}_{gb} + \bar{R}_{05} + \bar{F}_{sht} = 0, \quad (23)$$

$$\sum_{л.5} \bar{M}_D = 0,$$

$$\bar{M}_{R05} + \bar{l}_5 \times \bar{R}_{05} + \bar{M}_{ibal} + (\bar{l}_5 - \lambda_3 \bar{l}_E) \times (\bar{G}_{bal} + \bar{\Phi}_{bal}) + (\bar{l}_5 + \lambda_4 \bar{l}_E) \times (\bar{G}_{gb} + \bar{\Phi}_{gb}) + (\bar{l}_5 + \bar{l}_{sht}) \times \bar{F}_{sht} = 0$$

Для траверси запишемо також два рівняння:

$$\sum_{л.4} \bar{F}_i = 0, \quad (24)$$

$$\bar{R}_{24} + \bar{G}_{tr} + \bar{\Phi}_{tr} + \bar{R}_{54} + \bar{R}_{34} = 0, \quad (25)$$

$$\sum_{л.4} \bar{M}_D = 0,$$

$$\bar{M}_{R24} - \bar{l}_4 \times \bar{R}_{24} + \bar{M}_{itr} - \bar{l}_{41} \times \bar{R}_{34} + \bar{M}_{R34} = 0.$$

Додамо по два рівняння рівноваги сил і моментів сил, які прикладені до шатунів 2 і 3:

$$\sum_{л.3} \bar{F}_i = 0, \quad (26)$$

$$\bar{R}_{13} + \bar{G}_3 + \bar{\Phi}_3 + \bar{R}_{43} = 0; \quad (27)$$

$$\sum_{л.3} \bar{M}_{B_1} = 0,$$

$$\bar{M}_{R13} - \bar{l}_3 \times \bar{R}_{13} + \bar{M}_3 - \bar{l}_{S3} \times \bar{G}_3 - \bar{l}_{S3} \times \bar{\Phi}_3 + \bar{M}_{R43} = 0; \quad (28)$$

$$\sum_{л.2} \bar{F}_i = 0,$$

$$\bar{R}_{12} + \bar{G}_2 + \bar{\Phi}_2 + \bar{R}_{42} = 0; \quad (29)$$

$$\sum_{л.2} \bar{M}_B = 0,$$

$$\bar{M}_{R12} - \bar{l}_2 \times \bar{R}_{42} + \bar{M}_2 - \bar{l}_{S2} \times \bar{G}_2 - \bar{l}_{S2} \times \bar{\Phi}_2 + \bar{M}_{R42} = 0;$$

де  $\lambda_3 = CE/CS_{bal}, \lambda_4 = CE/CS_{gb}$ .

У рівняннях (25), (27), (29) перед векторним добутком знак «мінус» вказується тому, що вектори  $\bar{l}_4, \bar{l}_{41}, \bar{l}_{S2}$  і  $\bar{l}_{S3}$  необхідно брати з протилежним напрямком.

Оскільки  $\bar{R}_{54} = -\bar{R}_{45}, \bar{R}_{43} = -\bar{R}_{34}, \bar{R}_{42} = -\bar{R}_{24}, \bar{M}_{R43} = -\bar{M}_{R34}, \bar{M}_{R42} = -\bar{M}_{R24}$ , то рівняння (22)... (29) відповідно перепишемо

$$\sum_{л.5} \bar{F}_i = 0, \quad (30)$$

$$\bar{R}_{45} + \bar{G}_{bal} + \bar{\Phi}_{bal} + \bar{G}_{gb} + \bar{\Phi}_{gb} + \bar{R}_{05} + \bar{F}_{sht} = 0; \quad (31)$$

$$\sum_{л.5} \bar{M}_D = 0,$$

$$\bar{M}_{R05} + \bar{l}_5 \times \bar{R}_{05} + \bar{M}_{ibal} + (\bar{l}_5 - \lambda_3 \bar{l}_E) \times (\bar{G}_{bal} + \bar{\Phi}_{bal}) + (\bar{l}_5 + \lambda_4 \bar{l}_E) \times (\bar{G}_{gb} + \bar{\Phi}_{gb}) + \bar{l}_E \times \bar{F}_{sht} = 0; \quad (32)$$

$$\sum_{л.4} \bar{F}_i = 0,$$

$$\bar{R}_{24} + \bar{G}_{tr} + \bar{\Phi}_{tr} - \bar{R}_{45} + \bar{R}_{34} = 0, \quad (33)$$

$$\sum_{л.4} \bar{M}_D = 0,$$

$$\bar{M}_{R24} - \bar{l}_4 \times \bar{R}_{24} + \bar{M}_{itr} - \bar{l}_{41} \times \bar{R}_{34} + \bar{M}_{R34} = 0; \quad (34)$$

$$\sum_{л.3} \bar{F}_i = 0,$$

$$\bar{R}_{13} + \bar{G}_3 + \bar{\Phi}_3 - \bar{R}_{34} = 0; \quad (35)$$

$$\sum_{л.3} \bar{M}_{B_1} = 0,$$

$$\bar{M}_{R13} - \bar{l}_3 \times \bar{R}_{13} + \bar{M}_3 - \bar{l}_{S3} \times \bar{G}_3 - \bar{l}_{S3} \times \bar{\Phi}_3 - \bar{M}_{R34} = 0; \quad (36)$$

$$\sum_{л.2} \bar{F}_i = 0,$$

$$\bar{R}_{12} + \bar{G}_2 + \bar{\Phi}_2 - \bar{R}_{24} = 0;$$

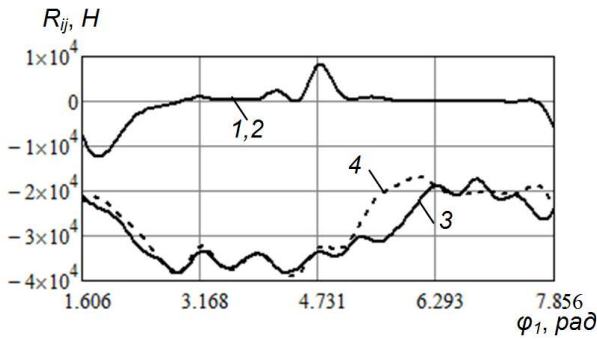
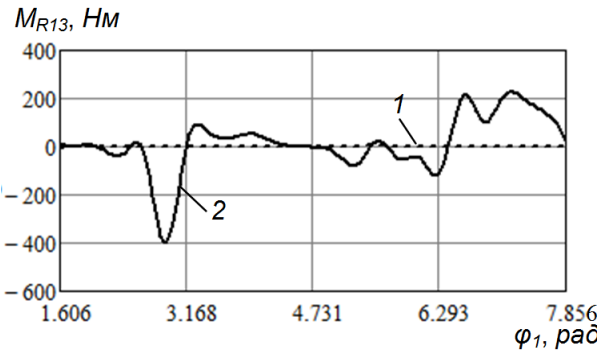
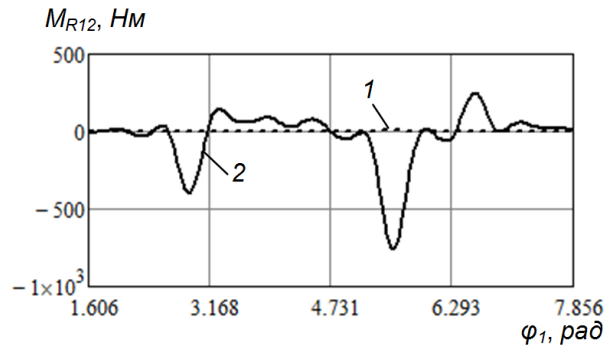


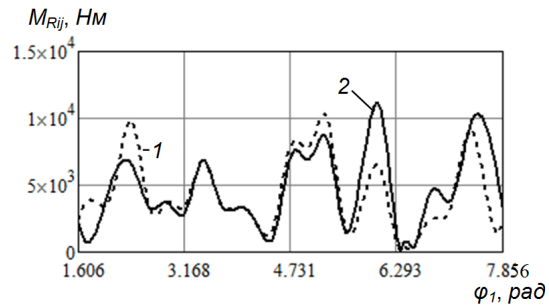
Рисунок 4 – Значення проєкцій реакцій  $R_{12}$  і  $R_{13}$  у кінематичних парах  $A$  і  $A_1$



1 – на вісь  $x$ ; 2 – на вісь  $y$   
Рисунок 6 – Значення проєкцій моменту сили реакції  $M_{R13}$



1 – на вісь  $x$ ; 2 – на вісь  $y$   
Рисунок 5 – Значення проєкцій моменту сили реакції  $M_{R12}$



1 – момент сили реакції  $M_{R24}$ ;  
2 – момент сили реакції  $M_{R34}$   
Рисунок 7 – Графіки моментів сил реакцій  $M_{R24}$  і  $M_{R34}$  у шарнірах  $B$  і  $B_1$

$$\sum_{л.2} \bar{M}_B = 0, \quad (37)$$

$$\bar{M}_{R12} - \bar{l}_2 \times \bar{R}_{42} + \bar{M}_2 - \bar{l}_{S2} \times \bar{G}_2 - \bar{l}_{S2} \times \bar{\Phi}_2 - \bar{M}_{R24} = 0.$$

Дев'яте рівняння буде умовою рівноваги сил, які діють на ланки структурної групи

$$\bar{R}_{12} + \bar{G}_2 + \bar{\Phi}_2 + \bar{G}_3 + \bar{\Phi}_3 + \bar{R}_{13} + \bar{G}_{tr} + \bar{\Phi}_{tr} + \bar{G}_{bal} + \bar{\Phi}_{bal} + \bar{G}_{gb} + \bar{\Phi}_{gb} + \bar{R}_{05} + \bar{F}_{sht} = 0, \quad (38)$$

а десяте – умовою рівноваги моментів сил відносно точки  $C$ , які діють на балансир

$$\sum_{л.5} \bar{M}_C = 0, \quad (39)$$

$$\bar{M}_{R05} - \bar{l}_5 \times \bar{R}_{45} + \bar{M}_{ibal} - \lambda_3 \bar{l}_E \times (\bar{G}_{bal} + \bar{\Phi}_{bal}) + \lambda_4 \bar{l}_E \times (\bar{G}_{gb} + \bar{\Phi}_{gb}) + \bar{l}_E \times \bar{F}_{sht} = 0.$$

Рівняння кінестатики утворюють систему, яка визначає невідомі реакції у кінематичних парах:  $\bar{R}_{12}$ ,  $\bar{R}_{13}$ ,  $\bar{R}_{24}$ ,  $\bar{R}_{34}$ ,  $\bar{R}_{45}$ ,  $\bar{R}_{05}$ ,  $\bar{M}_{R12}$ ,  $\bar{M}_{R13}$ ,  $\bar{M}_{R24}$ ,  $\bar{M}_{R34}$ ,  $\bar{M}_{R05}$ .

Під час роботи балансир коливається у вертикальній площині і сили, які діють на нього, розміщені у цій площині, тому момент пари сил реакції у шарнірі  $C$   $\bar{M}_{R05} = 0$ .

Описаний алгоритм кінестатичного дослідження просторового механізму реалізова-

ний для верстата – гойдалки моделі 7СК12-2,5-5600 за допомогою програмного пакету Mathcad.

На рис. 4, 5, 6, 7 наведено результати досліджень навантаження елементів кінематичних пар, якими шатуни з'єднані з іншими ланками механізму привода.

На рис. 4 зображено графіки значень складових реакцій  $\bar{R}_{12}$  і  $\bar{R}_{13}$ , які діють у з'єднаннях шатунів з кривошипом (шарніри  $A$ ,  $A_1$ ). Проекції цих реакцій на вісь  $x$   $\bar{R}_{12x}$  і  $\bar{R}_{13x}$  показані графіками 1 і 2. Відмінність у числових значеннях цих складових не значна, тому графіки 1 і 2 накладаються. Вертикальні складові  $\bar{R}_{12y}$  і  $\bar{R}_{13y}$  зображені відповідно графіками 3 і 4. Проекції реакцій на вісь  $z$   $\bar{R}_{12z}$  і  $\bar{R}_{13z}$  дорівнюють нулю і на рисунку не зображені.

На рис. 5, 6 зображено графіки моментів сил реакцій  $M_{R12}$  і  $M_{R13}$  у рухомих з'єднаннях шатунів (шарніри  $A$ ,  $A_1$ ). Проекції моментів на вісь  $x$  (графік 1) за величиною не перевищують 10 Нм. Вертикальні складові  $M_{R12y}$  і  $M_{R13y}$  на рисунках показані графіками 2.

На рис. 7 наведено графіки абсолютних значень моментів сил реакцій  $M_{R24}$  і  $M_{R34}$ , які діють у кінематичних парах  $B$  і  $B_1$  під час роботи верстата-гойдалки.

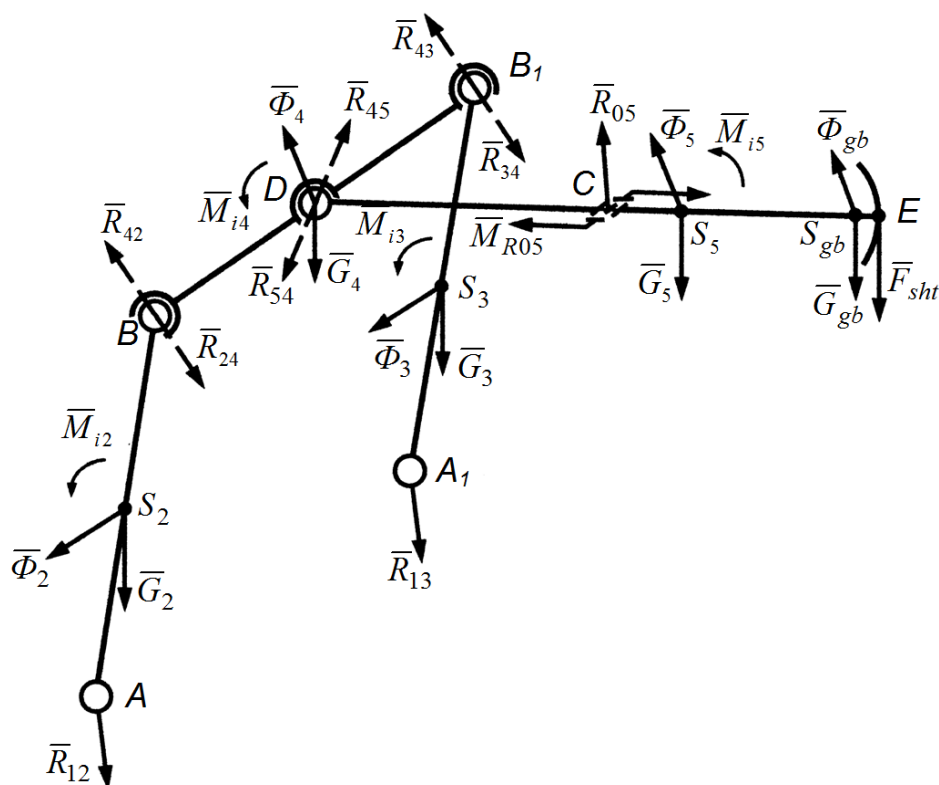


Рисунок 8 – Розрахункова схема для визначення реакцій у кінематичних парах механізму без надлишкових зв’язків

Аналіз отриманих результатів досліджень вказує на те, що у механізмі привода верстата-гойдалки з надлишковими зв’язками навантаження на шатуні розподіляються нерівномірно. Причиною такого розподілу є наявність пружних деформацій шатунів.

Зменшити додаткові навантаження на шатуні привода, які спричинені пружними деформаціями, можна усуненням надлишкових зв’язків у конструкції важільного механізму верстата-гойдалки.

На другому етапі проведені кінетостатичні дослідження важільного механізму верстата-гойдалки без надлишкових зв’язків. Усунення надлишкових зв’язків здійснюється зміною рухомості окремих кінематичних пар. У роботі [3] авторами запропоновано схему досліджуваного механізму без надлишкових зв’язків, в якому чотири обертальні кінематичні пари  $A, A_1$  і  $B, B_1$  замінені сферичними III класу.

На рис. 8 зображена розрахункова схема для визначення реакцій у рухомих з’єднаннях шатунів з ланками механізму привода. Кінематичні пари третього класу (шарніри  $A, A_1, B, B_1, D$ ) не допускають поступальних переміщень одного елемента відносно іншого. Зв’язки можна замінити силою реакції  $\bar{R}_{ji}$ , яка проходить через центр шарніра. Модуль і напрям сили реакції невідомі.

Для кожної ланки можна записати рівняння рівноваги сил і моментів сил.

Рівняння рівноваги сил і моментів сил для балансира:

$$\sum_{l.5} \bar{F}_i = 0, \quad (40)$$

$$\bar{R}_{45} + \bar{G}_5 + \bar{\Phi}_5 + \bar{G}_{gb} + \bar{\Phi}_{gb} + \bar{R}_{05} + \bar{F}_{sht} = 0;$$

$$\sum_{l.5} \bar{M}_C = 0, \quad (41)$$

$$\bar{l}_5 \times \bar{R}_{45} + \bar{M}_{R05} + \bar{M}_{ubal} - \lambda_3 \bar{l}_E \times \bar{G}_{bal} - \lambda_3 \bar{l}_E \times \bar{\Phi}_{bal} + \lambda_4 \bar{l}_E \times \bar{G}_{gb} + \lambda_4 \bar{l}_E \times \bar{\Phi}_{gb} + \bar{l}_E \times \bar{F}_{sht} = 0;$$

$$\sum_{l.5} \bar{M}_D = 0, \quad (42)$$

$$\bar{M}_{R05} + \bar{l}_5 \times \bar{R}_{05} + \bar{M}_{ubal} + (\bar{l}_5 - \lambda_3 \bar{l}_E) \times (\bar{G}_{bal} + \bar{\Phi}_{bal}) + (\bar{l}_5 + \lambda_4 \bar{l}_E) \times (\bar{G}_{gb} + \bar{\Phi}_{gb}) + \bar{l}_E \times \bar{F}_{sht} = 0,$$

де  $\lambda_3 = CE/CS_{bal}$ ,

$\lambda_4 = CE/CS_{gb}$ ,

$\bar{l}_E = (l_{CE} \ 0 \ 0)^T$ .

За рівняннями (40)...(42) визначають невідомі  $\bar{R}_{05}$ ,  $\bar{R}_{45}$  і  $\bar{M}_{R05}$ .

Рівняння рівноваги сил і моментів сил, які діють на траверсу:

$$\sum_{l.4} \bar{F}_i = 0, \quad (43)$$

$$\bar{R}_{24} + \bar{G}_4 + \bar{\Phi}_4 + \bar{R}_{54} + \bar{R}_{34} = 0;$$

$$\sum_{l.4} \bar{M}_D = 0, \quad (44)$$

$$-\bar{l}_4 \times \bar{R}_{24} + \bar{M}_{i4} - \bar{l}_{41} \times \bar{R}_{34} = 0.$$

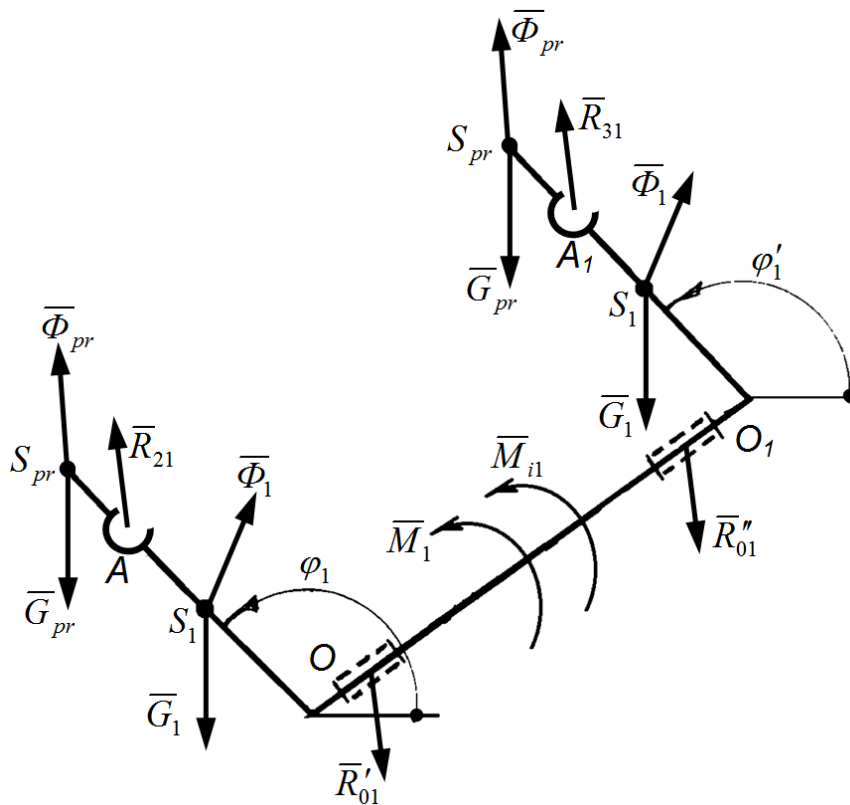


Рисунок 9 – Розрахункова схема кривошипа

Рівняння рівноваги сил, які діють на шатуни 2 і 3:

$$\sum_{л.2} \bar{F}_i = 0, \quad \bar{R}_{12} + \bar{G}_2 + \bar{\Phi}_2 + \bar{R}_{42} = 0; \quad (45)$$

$$\sum_{л.3} \bar{F}_i = 0, \quad \bar{R}_{13} + \bar{G}_3 + \bar{\Phi}_3 + \bar{R}_{43} = 0. \quad (46)$$

Розв'язком системи рівнянь (43)...(46) є шукані реакції  $\bar{R}_{24}$ ,  $\bar{R}_{34}$ ,  $\bar{R}_{12}$ ,  $\bar{R}_{13}$ .

Розглянемо навантаження кривошипа. На рис. 9 зображено його розрахункову схему. До кривошипа прикладені: ваги гілок кривошипа  $\bar{G}_1$  і противаг  $\bar{G}_{pr}$ , реакції  $\bar{R}_{21}$  і  $\bar{R}_{31}$ , які стали відомими  $\bar{R}_{21} = -\bar{R}_{12}$ ,  $\bar{R}_{31} = -\bar{R}_{13}$ , момент сил інерції  $\bar{M}_{i1}$ , сили інерції противаг  $\bar{\Phi}_{pr}$  і гілок кривошипа  $\bar{\Phi}_{kr}$ , невідомі реакція  $\bar{R}'_{01}$ ,  $\bar{R}''_{01}$  стояка і зовнішній момент  $\bar{M}_1$ .

Запишемо рівняння рівноваги моментів сил відносно осі  $OO_1$ :

$$\bar{M}_1 + \bar{M}_{i1} + 2\bar{l}_{pr} \times (\bar{\Phi}_{pr} + \bar{G}_{pr}) + 2\bar{l}_{S1} \times (\bar{\Phi}_1 + \bar{G}_1) + \bar{l}_1 \times \bar{R}_{21} + \bar{l}_{11} \times \bar{R}_{31} = 0, \quad (47)$$

де 
$$\bar{l}_{pr} = OS_{pr} \begin{pmatrix} \cos \varphi_1 \\ \sin \varphi_1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \bar{l}_{S1} = OS_1 \begin{pmatrix} \cos \varphi_1 \\ \sin \varphi_1 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Сила інерції мас противаг і мас гілок кривошипа

$$\bar{\Phi}_{pr} = -m_{pr} \bar{a}_{Spr}, \quad \bar{\Phi}_1 = -m_1 \bar{a}_{S1}.$$

Момент інерції кривошипа відносно осі обертання

$$\bar{M}_{i1} = -\bar{\varepsilon}_1 J_z,$$

де

$$J_z = 2 \left( \frac{m_1 (OS_{pr})^2}{12} + m_1 (OS_1)^2 + m_{pr} (OS_{pr})^2 \right).$$

Невідомий зовнішній момент  $\bar{M}_1$  складається із складових  $\bar{M}_1 = \bar{M}_z + \bar{M}_{R01}$ . Обертовий момент  $\bar{M}_z$  – це зрівноважувальний момент сил, який передається на кривошип вихідним валом редуктора привода верстата-гойдалки і паралельний до осі  $z$ . А момент  $\bar{M}_{R01}$  є моментом сили реакції в обертальній кінематичній парі, причому вектор моменту  $\bar{M}_{R01}$  перпендикулярний до осі  $z$ .

Умова рівноваги сил, прикладених до кривошипа, виглядає таким чином:

$$\bar{R}_{01} + 2\bar{G}_1 + 2\bar{\Phi}_1 + 2\bar{G}_{pr} + 2\bar{\Phi}_{pr} + \bar{R}_{21} + \bar{R}_{31} = 0, \quad (48)$$

де  $\bar{R}_{01} = \bar{R}'_{01} + \bar{R}''_{01}$ .

Результати розв'язків рівнянь (40)...(48), які описують умови рівноваги сил і моментів для механізму без надлишкових зв'язків, наведені нижче.

На рис.10 зображені графіки значень складових реакцій  $\bar{R}_{12}$  і  $\bar{R}_{13}$ , які діють у з'єднаннях шатунів з кривошипом. Проекції цих реакцій на вісь  $x$   $\bar{R}_{12x}$  і  $\bar{R}_{13x}$  зображені графіками 1 і 2, а

вертикальні складові  $\bar{R}_{12y}$  і  $\bar{R}_{13y}$  зображені відповідно графіками 3 і 4. Відмінність у числових значеннях цих складових відсутня, тому графіки 1,2 і 3,4 накладаються. Проекції реакцій на вісь  $z$   $\bar{R}_{12z}$  і  $\bar{R}_{13z}$  рівні нулю і на рисунку не показані. Це вказує на рівномірне навантаження шатунів під час роботи штангової глибинонасосної установки.

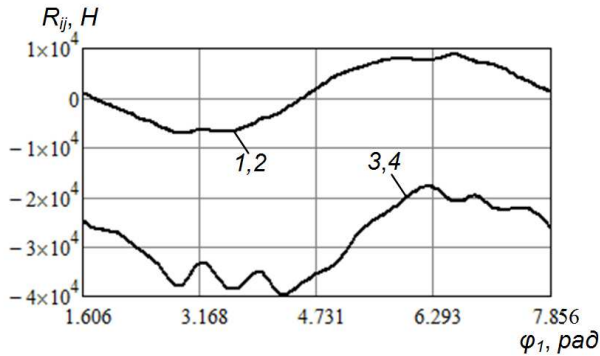
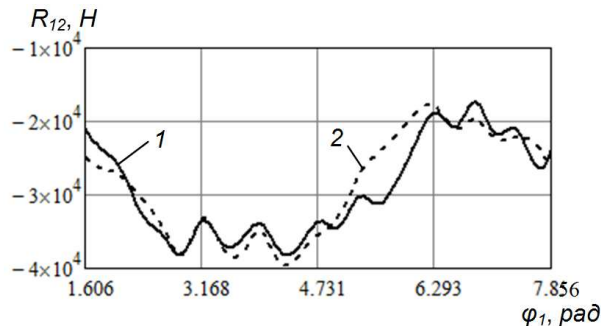


Рисунок 10 – Значення складових реакцій  $R_{12}$  і  $R_{13}$  у кінематичних парах  $A$  і  $A_1$

За наявності надлишкових зв'язків значення складових реакцій  $\bar{R}_{12}$  та  $\bar{R}_{13}$  значно відрізняються від аналогічних величин для раціонального механізму без надлишкових зв'язків.

Так, при порівнянні складової реакції  $\bar{R}_{12}$  на вісь  $y$  для двох вищевказаних варіантів відхилення між складовими становить до 6,9 кН (рис. 11).

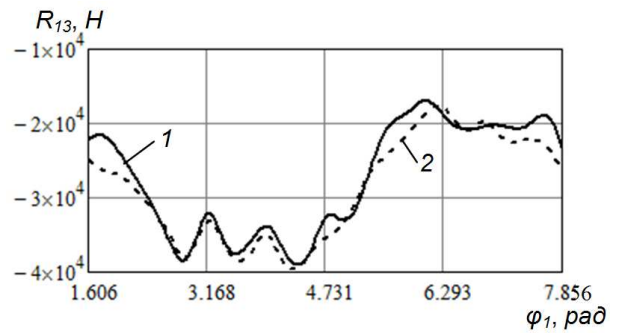


1 – у механізмі з надлишковими зв'язками;  
2 – у механізмі без надлишкових зв'язків

Рисунок 11 – Значення складової реакції  $R_{12y}$

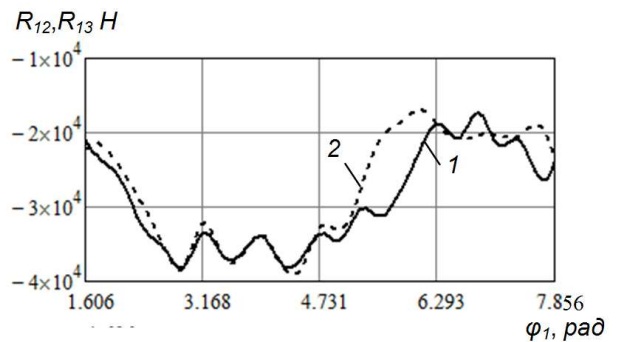
Для реакції  $\bar{R}_{13}$  похибка досягає до 5,6 кН (рис. 12). Причому для складової реакції  $\bar{R}_{12y}$  значення максимальної похибки величина від'ємна ( $R_{12y} < R_{012y}$ ), а для складової реакції  $\bar{R}_{13y}$  – додатня ( $R_{13y} > R_{013y}$ ).

Крім того, в реальному механізмі з надлишковими зв'язками значення реакцій  $\bar{R}_{12}$  та  $\bar{R}_{13}$  значно відрізняються один від одного. Так, в проекції на вісь  $y$  похибка між складовими реакцій досягає до 10 кН (рис. 13).



1 – у механізмі з надлишковими зв'язками;  
2 – у механізмі без надлишкових зв'язків

Рисунок 12 – Значення складової реакції  $R_{13y}$

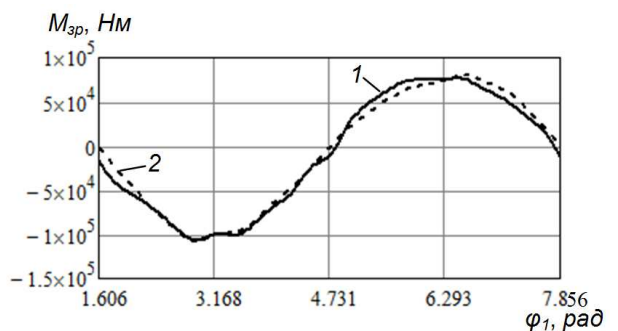


1 – складова  $R_{12y}$ ; 2 – складова  $R_{13y}$

Рисунок 13 – Значення складових реакцій

Варто також зауважити, що похибка між реакціями шатунів присутня не тільки у проекції на вісь  $y$ . При проходженні так званих крайніх положень важільного механізму (точка підвісу штанг знаходиться максимально вверху або внизу) похибка між складовими реакціями  $\bar{R}_{12}$  та  $\bar{R}_{13}$  на вісь  $x$  досягає 6,7 кН.

Відмінність у навантаженості двох шатунів також призводить до зміни зрівноважувального моменту на валу кривошипа (рис. 14).



1 – у механізмі з надлишковими зв'язками;  
2 – у механізмі без надлишкових зв'язків

Рисунок 14 – Графіки зрівноважувального моменту на кривошипі

Максимальна різниця значень зрівноважувального моменту для важільного механізму верстата-гойдалки без надлишкових зв'язків і реального з надлишковими зв'язками досягає 20 кНм.

На підставі вищенаведених досліджень можна зробити такі **висновки**.

1. Описаний алгоритм кінематичного і кінетостатичного дослідження просторового шестиланкового важільного механізму верстата-гойдалки дає змогу:

- визначити реальне навантаження на ланки механізму з врахуванням надлишкових зв'язків;

- виявити відхилення між реакціями раціонального і реального механізмів верстата-гойдалки;

2. Реакції реального важільного механізму верстата-гойдалки значно відрізняються від раціонального без надлишкових зв'язків. Різниця становить близько 7 кН. Крім того, між реакціями обох шатунів виявлено також відмінність, що сягає 5 кН.

3. Значне розходження навантаження між шатунами призводить до нерівномірного навантаження гілок кривошипа і вихідного вала редуктора привода і, як наслідок, до зміни величини зрівноважувального моменту.

1 Аливердизаде К.С. Балансирные индивидуальные приводы глубиннонасосной установки [Текст] / К.С. Аливердизаде. Баку – Л.: Гостехиздат, 1951. – 215 с.

2 Крижанівський Є.І. Аналіз структурних схем виконавчих механізмів верстатів-качалок. / Є.І. Крижанівський, Б.Д. Малько, В.Я. Попович // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2007. – № 2. – С. 73-76.

3 Попович В.Я. Дослідження впливу динамічних похибок важільного механізму верстата-качалки на деформацію і переміщення його ланок [Текст] / В.Я. Попович, В. М. Сенчішак, В.Р. Харун // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2014. – № 4(53) – С. 135-140.

4 Зиновьев В.Я. Пространственные механизмы с низшими парами / В.Я. Зиновьев // Кинематический анализ и синтез. – М.: Издат. технико-теоретической литературы, 1952. – 431 с.

5 Комп'ютерне дослідження кінематики механізмів: навчально-наочний посібник [Текст] / В.І. Векерик, К.Г. Левчук, С.Т. Степаненко, І.В. Цидило. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2011. – 150 с.

6 Алгоритмізація та програмування. Mathcad: навчальний посібник / Я.С. Паранчук, В.І. Мороз. – 2-ге вид. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2012. – 312 с.

7 Бруевич Н.Г. Кинетостатика пространственных механизмов / Н.Г. Бруевич, Б.О. Мардер. – М.: Наука, 1981. – 102 с.

*Стаття надійшла до редакційної колегії  
15.11.16*

*Рекомендована до друку  
професором Крижанівським Є.І.  
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)  
канд. техн. наук Тарабаріновим П.В.  
(НДПІ ПАТ «Укрнафта», м. Івано-Франківськ)*

# Історія нафтогазової науки і техніки

УДК 81'36

## МОВНІ РІВНІ ВДОСКОНАЛЕННЯ НАУКОВО-ТЕХНІЧНОГО ТЕКСТУ

М. І. Венгринюк, О. М. Мельник

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15; тел. (0342) 505051;  
e-mail: pereklad@nung.edu.ua

*Проаналізовано мовні рівні вдосконалення науково-технічного тексту, розкрито способи уникнення «наукового жаргону». Наголошено, що науково-технічна мова потребує реформування, відновлення питомо українських мовних засобів. Обґрунтовано думку про те, що автор науково-технічного тексту повинен зважати на мовну традицію, використовуючи одиниці лексико-семантичного, морфологічного та синтаксичного рівнів мови. Подано типові приклади порушення мовних норм та запропоновано варіанти замінення неправильних лексико-граматичних конструкцій.*

Ключові слова: мовна традиція, питома українські мовні засоби, «науковий жаргон», мовні рівні, типове порушення мовних норм.

*Проанализированы языковые уровни усовершенствования научно-технического текста, раскрыты способы избежания «научного жаргона». Отмечено, что научно-технический текст нуждается в реформировании, восстановлении исконно украинских языковых средств. Обосновано мнение о том, что автор научно-технического текста должен учитывать языковую традицию при использовании единиц лексико-семантического, морфологического и синтаксического уровней языка. Поданы примеры нарушения языковых норм и предложены варианты замены неправильных лексико-грамматических конструкций.*

Ключевые слова: языковая традиция, исконно украинские языковые средства, «научный жаргон», языковые уровни, нарушения языковых норм.

*The linguistic levels for improving the scientific and technical text are analyzed. The ways of avoiding “the scientific jargon” are developed. The article emphasizes the need for improving and reforming the scientific and technical language by reviving originally Ukrainian linguistic units. The assumption that the author of a scientific and technical text has to write with regard to Ukrainian language traditions on lexico-semantic, morphological and syntactic levels is proved. The examples of typical violation of language norms are described and the variants of substituting incorrect lexico-grammatical constructions are proposed.*

Key words: language tradition, originally Ukrainian linguistic units, “scientific jargon”, linguistic levels, typical violation of language norms.

Готуючи до друку матеріали дослідження, автор науково-технічного тексту повинен зважати не тільки на їхній зміст, а й мовне оформлення. Грамотний виклад, доречний вибір лексичних і граматичних засобів – запорука створення якісного наукового продукту. Часто науковець ставить запитання: правильно чи неправильно вжито слово, дібрано синонім, використано варіант граматичної форми, побудовано речення. Це і не дивно. Українська науково-технічна мова, що зазнала впливу російської мови та жорстких книжних традицій, ще довго відчуватиме «присутність» чужорідних елементів.

**Мета статті** – зорієнтувати авторів науково-технічних текстів у виборі питомо українсь-

ких лексико-граматичних засобів, що сформувалися на народній основі. Поставлена мета передбачає вирішення таких завдань:

- розкрити особливості формування української наукової мови;
- подати варіанти нормативного замінення неправильних лексико-граматичних конструкцій у науково-технічних текстах та прокоментувати види мовленнєвих помилок.

### Виклад основного матеріалу

Сьогодні науково-технічна мова вимагає реформування, оновлення, звільнення від засад книжної традиції, повернення в науковий обіг питомо українських лексичних і граматичних

засобів. Українська дослідниця Н. Непийвода слушно зауважує: «Незграбний, важкий для розуміння виклад – це ознака минулого. Майбутнє за комунікативно досконалою писемною мовою» [5, 490]. Писати так, щоб тебе розуміли, – це вимога сучасної науки.

На жаль, у науково-технічний виклад проникають ті мовні явища, які в мовознавстві називають «науковим жаргоном» [2; 6]. Надмірне використання іншомовних слів, переобтяження тексту громіздкими реченнями, нагромадження т. зв. розщеплених присудків та іменників у родовому відмінку – це ті чинники, які ускладнюють розуміння і сприйняття тексту, роблять його «закритим» для читача. Інколи автор пише так, ніби хоче, щоб його не зрозуміли [6].

Варто зауважити, що українська наукова традиція починала формуватися на основі народної мови, далекої від книжності, канцеляриту, безособовості. Природний, живомовний спосіб відтворення дійсності, експресивність, виявлення авторської індивідуальності – яскраві риси української наукової мови. Недарма І. Пулюй застерігав: «Коли наукова мова відоб'ється від народної, то «заросте лободою» [цит. за: 6].

Зважати на українську традицію у вибранні форм слів закликають і нормативні документи. Дослідники зазначають, що українська терміносистема, зокрема нафтогазової промисловості, упродовж усього періоду розвитку і становлення творилася на основі національної мови [1]. Більшість термінів на позначення виробничих дій і операцій – українського походження. Однак сильним є вплив світового розвитку науки, техніки й, відповідно, так звана «мовна мода» на невиправдані запозичення. У ДСТУ 3966-2009 «Термінологічна робота. Засади і правила розроблення стандартів на терміни та визначення понять» вказано: «Добираючи терміни для стандартизування, слід віддавати перевагу термінам українського походження перед запозиченими. Однак, у разі доцільності запозичення, іншомовні терміни треба пристосовувати до законів української мови.

Зокрема, запозичаючи назву процесу, треба насамперед від іншомовного слова утворити українське дієслово недоконаного виду, а далі всі необхідні похідні слова (форма: процес – формувати, формування, сформувати, сформування; наслідок – формування, формація)» [7].

Дослідники вважають, що в науковому тексті непотрібні запозичення надають викладу штучної наукоподібності. Чужі слова – важливий, але не єдиний засіб позначати нові речі. Творення нових слів, переосмислення вже наявної лексики (розвиток багатозначності), утворення словосполучень – ці внутрішні джерела видаються природнішими, ніж запозичення [6].

Безперечно, немає підстав у науковому тексті замість питомих слів (*різномірний, визначати, зумовлювати, спричиняти, порівняльний, відповідник, згущувати, уцілювати, очищений, вторинний*) конче вживати запозичення (*гетерогенний, детермінувати, компаративний, еквівалент, конденсувати, рафінований, секундарний*). Ось варіанти можливих лексичних дублетів:

1. Загальнонаукові терміни: *фактор* – чинник; *прогрес* – поступ; *класифікація* – поділ; *комплекс* – сукупність; *параметр* – величина; *структура* – будова; *компонент* – складник; *принцип* – засада; *критерій* – мірило; *функція* – призначення; *варіація* – видозміна; *комбінація* – поєднання.

2. Спеціальні терміни: *рефлектор* – відбивач; *рефрактор* – заломлювач; *автогенний* – самозварювальний; *інвертор* – перетворювач; *стартер* – запускар; *трансформатор* – перетворювач; *автооксидация* – самоокислювання; *дегідрация* – зневоднення; *циркуляція* – обіг.

Проаналізовані джерела (фахові статті науково-технічних журналів «Геолог України», «Геологічний журнал» за 2010-2012 рр.; матеріали Міжнародної науково-технічної конференції «Нафтогазова енергетика 2013») дали змогу виявити значну кількість порушень мовних норм. Нижче подано табл. 1–5, у яких запропоновано варіанти замінення недоречно вжитих лексико-граматичних конструкцій.

**Таблиця 1 – Росіянізми, кальки сталих сполучень слів**

<b>Порушення лексичних норм</b>	<b>Відредагований варіант</b>
...глибини вибою та точки вимірювання тиску <i>не співпадають</i> .	...глибини вибою та точки вимірювання тиску <i>не збігаються</i> .
...іноді їх використовують <i>в якості</i> попереднього очищувального пристрою...	...іноді їх використовують <i>як</i> попередній очищувальний пристрій...
... <i>на протязі</i> досить тривалого часу...	... <i>протягом</i> досить тривалого часу...
Точність визначення <i>в значній мірі</i> залежить...	Точність визначення <i>значною мірою</i> залежить...
Проте щодо цього існують деякі <i>розходження</i> між нашим і попереднім висновком.	Проте щодо цього існують деякі <i>розбіжності</i> між нашим і попереднім висновком.
<i>На сьогодні</i> ця технологія промислово освоєна...	<i>Сьогодні</i> ця технологія промислово освоєна...
В геологічному аспекті річка Амазонка <i>знаходиться</i> на території Амазонської синеклізи.	В геологічному аспекті річка Амазонка <i>розташована</i> на території Амазонської синеклізи.

Продовження таблиці 1

Порушення лексичних норм	Відредагований варіант
Осадові басейни типу Амазонського сформувались у <i>результаті</i> розсіювання...	Осадові басейни типу Амазонського сформувалися <i>внаслідок</i> розсіювання...
<i>Більше того</i> , віднесення до пертитів...	<i>Крім того</i> , віднесення до пертитів...
...можна <i>прийти до висновку</i> ...	...можна <i>дійти висновку</i> ...
У лютому 2012 року зала Будинку вчених не вмістила усіх <i>бажаючих</i> ...	У лютому 2012 року зала Будинку вчених не вмістила всіх <i>охочих</i> ...
Це стосується <i>в першу чергу</i> великих за площею територій...	Це стосується <i>насамперед</i> великих за площею територій...
...ланцюжки підняття (як сучасних, так і <i>древніх</i> )...	...ланцюжки підняття (як сучасних, так і <i>давніх</i> )...
Кожна вибрана ділянка <i>являє собою зону</i> територіальної концентрації родовищ ВВ, НГПО і ППО...	Кожна вибрана ділянка – <i>це зона</i> територіальної концентрації родовищ ВВ, НГПО і ППО...
Особистий досвід дослідження різновікових проявів різнотипного гранітоутворення, у <i>тому числі</i> в межах УЩ...	Особистий досвід дослідження різновікових проявів різнотипного гранітоутворення, <i>зокрема й</i> у межах УЩ...
...певний фонд <i>діючих</i> фонтанних свердловин...	...певний фонд <i>робочих</i> фонтанних свердловин...

Таблиця 2 – Вживання слова у не властивому йому значенні

Порушення лексичних норм	Відредагований варіант
... <i>ступінь</i> деградації вибуреної породи...	... <i>ступінь</i> деградації вибуреної породи...
В <i>окремих</i> свердловинах їхня потужність сягає 900 м.	У <i>деяких</i> свердловинах їхня потужність сягає 900 м.
<i>Аналогічні задачі стоять</i> і для відкритих територій платформних і складчастих областей.	<i>Аналогічними є завдання</i> і для відкритих територій платформних і складчастих областей.
...у дрібному плагіоклазі основної маси антипертити <i>відсутні</i> .	...у дрібному плагіоклазі основної маси антипертитів <i>немає</i> .
...передбачає розробку напрямів <i>наступного</i> спрямування – фундаментального, методичного, практичного.	передбачає розробляння <i>таких</i> напрямів: фундаментального, методичного, практичного.
Подібна розмежованість біотитів <i>проявляється</i> і на іншій діаграмі.	Таку ж розмежованість біотитів <i>виявлено й</i> на іншій діаграмі.
Тому <i>дані</i> траєкторії руху в даній статті не будуть досліджуватись.	Тому <i>ці</i> траєкторії руху в статті не досліджуватимемо.
... <i>складає</i> 10%...	... <i>становить</i> 10%...

Таблиця 3 – Норми вживання форм іменника

Різновид порушення	Приклад із порушенням	Відредаговане речення
Вживання іншомовних іменників на позначення дії, що закінчуються на <i>-ція</i> , що не дає змоги розрізняти поняття дії і події (недоконаного та доконаного видів)	Принципи <i>інтерпретації</i> даних каротажу. Дослідження процесу відкладання парафіну при <i>експлуатації</i> нафтових свердловин. <i>Фільтрація</i> газу в тріщинуватих колекторах. Темпи <i>регенерації</i> вуглеводнів.	Принципи <i>інтерпретування</i> даних каротажу. Дослідження процесу відкладання парафіну під час <i>експлуатування</i> нафтових свердловин. <i>Фільтрування</i> газу в тріщинуватих колекторах. Темпи <i>регенування</i> вуглеводнів.

Продовження таблиці 3

Різновид порушення	Приклад із порушенням	Відредаговане речення
Сплутування віддієслівних іменників на позначення об'єкта, наслідку та термінів на позначення дії, події	Методи <i>аналізу</i> аерокосмічних зображень. Глибоководний <i>видобуток</i> – складний високотехнологічний процес. Боротьба з конусоутворенням у процесі <i>розробки</i> газових і нафтогазоконденсатних родовищ. У процесі <i>розв'язку</i> задачі...	Методи <i>аналізування</i> аерокосмічних зображень. Глибоководне <i>видобування</i> – складний високотехнологічний процес. Боротьба з конусоутворенням у процесі <i>розробляння</i> газових і нафтогазоконденсатних родовищ. У процесі <i>розв'язування</i> задачі...
Розбіжність у відмінкових формах однорідних членів та узагальнювального слова; пропускання загальнювального слова перед двокрапкою	Усю південно-східну частину можна поділити на три сектори: <i>складчаста споруда, крайній сектор, зона соляних штоків</i> . На Пержанському родовищі розвідано дві ділянки: <i>Крушинська і Північна</i> . Визначено структуру різнорангових стратонів ( <i>регіоюруси, світи, товщі, верстви, ритми, цикліти</i> ). На конференції було розглянуто: <i>перспективи пошуків та прогнозна оцінка буритину, законодавство щодо видобутку та використання буритину, його класифікація та ін.</i>	Усю південно-східну частину можна поділити на три сектори: <i>складчасту споруду, крайній сектор, зону соляних штоків</i> . На Пержанському родовищі розвідано дві ділянки: <i>Крушинську і Північну</i> . Визначено структуру різнорангових стратонів ( <i>регіоюрусів, світ, товщ, верств, ритмів, циклітів</i> ). На конференції розглянуто такі питання: <i>перспективи пошуків та прогнозне оцінення буритину, законодавство щодо видобування та використання буритину, його класифікацію та ін.</i>

Таблиця 4 – Труднощі із вживанням дієслівних форм

Різновид порушення	Приклад із порушенням	Відредаговане речення
Мовні конструкції на позначення дії, складених з дієслова і віддієслівного іменника замість природнішого для української мови та економічного мовного засобу – дієслова	<i>Виконується реєстрування</i> швидкості. Газ <i>проходить</i> послідовну обробку в спеціальних системах. <i>Видобуток</i> нафти з цієї свердловини <i>здійснюється</i> за допомогою шлангового глибинного насосу. <i>Виконано аналіз</i> впливу названих чинників на дебіт. На основі експериментальних досліджень <i>здійснюється підбір</i> концентрації реагентів. <i>Для виконання</i> якісної очистки необхідно... Модуль <i>забезпечує реалізацію</i> таких функцій... Під впливом аніонів <i>відбувається стиснення</i> дифузного шару.	<i>Реєструють</i> (реєструємо) швидкість. Газ послідовно <i>обробляють</i> у спеціальних системах. <i>Видобувають</i> нафту з цієї свердловини за допомогою шлангового глибинного насосу. <i>Проаналізовано</i> вплив названих чинників на дебіт. На основі експериментальних досліджень <i>підбирають</i> (підбираємо) концентрації реагентів. Щоб якісно <i>очистити</i> , необхідно... Модуль <i>реалізує</i> такі функції... Під впливом аніонів <i>стискається</i> дифузний шар.

Продовження таблиці 4

Різновид порушення	Приклад із порушенням	Відредаговане речення
Невикористання форми наказового способу дієслова у спонукальних реченнях, де автор наукового тексту долучає читача до ходу своєї думки	<i>Припустимо, що U – універсальна множина. Перейдемо до розгляду технічного стану. Розглянемо детально підходи до ППР.</i>	<i>Припустімо, що U – універсальна множина. Перейдімо до розгляду технічного стану. Розгляньмо детально підходи до ППР.</i>
Надуживання форми «майбутнього часу визначень» з дієсловами «буде», «будуть» тощо	Аналогічно для вихідної змінної K <i>будемо мати...</i> Інші обмеження <i>будуть</i> строгими нерівностями.	Аналогічно для вихідної змінної K <i>маємо...</i> Інші обмеження <i>є</i> строгими нерівностями.
Пасивні дісприкметники dokonаного виду в ролі присудків (притаманні російському синтаксису)	Кількість термів <i>може бути визначена</i> за формулою... Тому <i>розроблені</i> спеціальні апарати і пристрої. На рисунку <i>показана</i> проекція. Для побудови функцій <i>був використаний</i> метод...	Кількість термів <i>можна визначити</i> за формулою... Тому <i>розроблено</i> спеціальні апарати і пристрої. На рисунку <i>показано</i> проекцію. Для побудови функцій <i>використано</i> метод...
Уживання пасивних конструкцій із дієсловами на -ся, неживі об'єкти дії у ролі підметів, що порушує логіку висловів, знеособлює мовлення, усуває із речень активних діячів	Для кожного дефекту <i>визначається</i> довжина, глибина, ширина. Енергоресурси, які <i>витрачаються</i> на переміщення газу.  Напруга <i>встановлюється</i> згідно інструкції. Отримана інформація <i>реєструється</i> і <i>записується</i> в архів.  <i>Нав'язувалась</i> думка про занепад нафтової промисловості і в колишньому СРСР.	Для кожного дефекту <i>визначають (-ємо)</i> довжину, глибину, ширину. Енергоресурси, які <i>витрачають (-ємо)</i> на переміщення газу.  Напругу <i>встановлюють (-ємо)</i> згідно з інструкцією. Отриману інформацію <i>реєструють (-ємо)</i> і <i>записують (-ємо)</i> в архів.  <i>Нав'язували</i> думку про занепад нафтової промисловості і в колишньому СРСР.
Вживання назви особи-діяча (логічного підмета) у формі орудного відмінка в конструкції з дієсловом у пасивній формі та з граматичним підметом – об'єктом дії	<i>Прихильниками</i> неорганічної гіпотези <i>була сформульована</i> робоча гіпотеза. <i>Фахівцями</i> спеціалізованих організацій <i>виконуються</i> топографічні і геодезичні дослідження. Проект судна <i>розроблений компанією</i> «Інтарі» в 2005 році. Цій темі <i>приділялась увага</i> науковцями Журавлем М. Ю., Семчуком Я. М. <i>Промисловістю</i> України <i>виготовляється</i> тільки один вид тампонажного цементу. <i>Материнськими компаніями</i> застосовуються такі важелі контролю.	<i>Прихильники</i> неорганічної гіпотези <i>сформулювали</i> робочу гіпотезу. <i>Фахівці</i> спеціалізованих організацій <i>виконують</i> топографічні і геодезичні дослідження. Проект судна <i>розробила</i> компанія «Інтарі» в 2005 році. Цій темі <i>приділяли увагу</i> науковці Журавель М. Ю., Семчук Я. М. <i>Промисловість</i> України <i>виготовляє</i> тільки один вид тампонажного цементу. <i>Материнські компанії</i> застосовують такі важелі контролю.

Продовження таблиці 4

Різновид порушення	Приклад із порушенням	Відредаговане речення
Не властиві українській мові активні дієприкметники теперішнього часу з суфіксами -уч- (-юч-), -ач- (-яч-)	Розроблення конструкції <i>самоуцілюючого</i> плунжера. <i>Понижуючий</i> триобмотковий оливний силовий трансформатор. <i>Зростаючі</i> можливості апаратних і програмних засобів <i>Існуючі</i> системи автоматизованого збору інформації. <i>Глибокозалягаючі</i> третинні та крейдові відклади.	Розроблення конструкції <i>самоуцілювального</i> плунжера. <i>Понижувальний</i> триобмотковий оливний силовий трансформатор. <i>Щораз вищі</i> можливості апаратних і програмних засобів <i>Сучасні</i> системи автоматизованого збору інформації. Третинні та крейдові відклади, що <i>глибоко залягають</i> .

Таблиця 5 – Складні випадки вживання займенників, прислівників та прийменників

Різновид порушення	Приклад із порушенням	Відредаговане речення
Зловживання складеною формою ступенів порівняння прикметників, прислівників	Виявлення повних відмов є <i>більш простим</i> завданням, ніж виявлення часткових відмов. <i>Більш точно</i> оцінити вірогідність роботи. Один із <i>найбільш авторитетних</i> геологів-нафтовиків західного світу.	Виявлення повних відмов є <i>простішим</i> завданням, ніж виявлення часткових відмов. <i>Точніше</i> оцінити вірогідність роботи. Один із <i>найавторитетніших</i> геологів-нафтовиків західного світу.
Присвійний займенник <i>їх</i> (неповний ступінь граматизації значення присвійності) замість займенників <i>їхній, їхня, їхнє, їхні</i> (повний ступінь)	Працюють не всі агрегати, а тільки <i>їх</i> частина. Локальні структури та <i>їх</i> морфологічні характеристики.	Працюють не всі агрегати, а тільки <i>їхня</i> частина. Локальні структури та <i>їхні</i> морфологічні характеристики.
Вживання прийменників <i>по, при</i> замість інших засобів	<i>При освоєнні</i> цих свердловин вільний дебіт становив... <i>По результатах</i> виконаних робіт визначена послідовність процедур обробки. <i>При таких темпах</i> відбору пластові тиски стабілізувались. Закачування води можливе тільки <i>при наявності</i> розгалуженої системи тріщин.	<i>Під час освоєння</i> цих свердловин вільний дебіт становив... <i>За результатами</i> виконаних робіт визначено послідовність процедур оброблення. <i>За таких темпів</i> відбирання пластові тиски стабілізувались. Закачування води можливе тільки <i>за наявності</i> розгалуженої системи тріщин.
Пропускання прийменників «від», «за», сполучника «ніж» та ін., які треба вживати з прикметниками або прислівниками у формі вищого ступеня порівняння	<i>Їх</i> проникність перевищувала 0, 1 мкм, а пористість <i>більше</i> 16 %.	<i>Їхня</i> проникність перевищувала 0, 1 мкм, а пористість – <i>більше, ніж</i> 16 %.

## Висновки

Унікати мовленнєвих помилок слід на всіх рівнях мовної системи: лексичному, морфологічному, синтаксичному. Автор науково-технічного тексту повинен дбати про використання природніших для української мови лексико-стилістичних і граматичних засобів та унікати знеособлення мовлення. Українська мовна традиція не підтримує вживання пасивних конструкцій із дієсловами на -ся; називання особи-діяча у формі орудного відмінка в конструкції з дієсловом у пасивній формі; використання пасивних дієприкметників dokonаного виду в ролі присудків; нагромадження активних дієприкметників теперішнього часу з суфіксами -уч- (-юч-), -ач- (-яч-); переобтяження тексту т. зв. розщепленими присудками.

Зменшують граматичну досконалість науково-технічного тексту ще й такі чинники: зловживання складеною формою ступенів порівняння прикметників, прислівників; використання присвійного займенника *їх* замість *їхній*, *їхня*, *їхне*, *їхні*; вживання прийменників *по*, *при* замість інших засобів; пропускання прийменників «від», «за», сполучника «ніж» та ін., які треба вживати з прикметниками або прислівниками у формі вищого ступеня порівняння.

Надмірне вживання іншомовних слів; сплутування значень віддієслівних іменників на позначення дії, події та наслідку; нагромадження іменників у родовому відмінку робить текст комунікативно недосконалим, оскільки змушує читача докладати додаткових мисленнєвих зусиль. Такий виклад часто називають «науковим жаргоном». Отже, стилістично довершений і грамотний науково-технічний текст забезпечує повноцінне засвоєння інформації, підтримує увагу читача, сприяє однозначному розумінню написаного.

## Література

1 Дорошенко С. Українська термінологія нафтогазової промисловості: становлення і розвиток : монографія / Світлана Дорошенко. — Полтава : Вид-во ПолтНТУ, 2013. — 139 с.

2 Зелінська Н. В. Поетика наукового тексту: українська наукова публіцистика XIX – початку XX ст. : автореф. дис. ... д-ра філол. наук : 10.01.08 / Н. В. Зелінська. — К., 2004. — 36 с.

3 Курило О. Уваги до сучасної української літературної мови / Олена Курило. — К. : Видавництво Соломії Павличко «Основи», 2004. — 303 с.

4 Матеріали Міжнародної наук.-техн. конференції «Нафтогазова енергетика 2013» (Івано-Франківськ, 7–11 жовтня 2013 р.) / Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. — Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2013. — 578 с.

5 Непийвода Н. Ф. Наукові засади редагування нехудожніх текстів / Н. Ф. Непийвода // Українська періодика: Історія і сучасність. — Львів, 2002. — С. 490.

6 Селігей П. О. Світло і тіні наукового стилю : монографія / Пилип Селігей. — К. : Києво-Могилянська академія, 2016. — 627 с.

7 Термінологічна робота. Засади і правила розроблення стандартів на терміни та визначення понять : ДСТУ 3966-2009. — [Чинний від 2010-07-01]. — К. : Держстандарт України, 2009. — 35 с.

8 Українська мова у XX сторіччі: історія лінгвоциду : док. і матеріали / упор. : Л. Масенко [та ін.]. — К. : Вид. дім «Києво-Могилянська академія», 2005. — 399 с.

*Стаття надійшла до редакційної колегії*  
23.11.16

*Рекомендована до друку*  
професором **Мойсишиним В.М.**  
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)  
канд. філол. наук **Іванишин Н.Я.**  
(Прикарпатський національний університет  
ім. В. Стефаника, м. Івано-Франківськ)

## Вітаємо Ювіляра



Роману  
Семеновичу  
Яремійчуку —



19 листопада 2016 року Яремійчуку Роману Семеновичу виповнилося 80 років.

Народився Роман Семенович 19 листопада 1936 року в селі Зібранівка Снятинського району Івано-Франківської області. Закінчив з відзнаками Дрогобицький нафтовий технікум (1950-1954), газонафтопромисловий факультет Львівського політехнічного інституту (1954-1959), після якого отримав диплом гірничого інженера за спеціальністю «Розробка та експлуатація нафтових і газових родовищ».

Працював на різних інженерних посадах до грудня 1966 р. (помічник бурильника, про-раб вишкомонтажного цеху, старший інженер тематичної партії в тресті «Львівнафтогазрозвідка», старший інженер, начальник дільниці буріння, начальник виробничо-технічного відділу, заступник директора контори розвідувального буріння та в.о. головного інженера тресту «Західбурнафтогаз» (м. Борислав Львівської області).

Навчався в очній аспірантурі Всесоюзного науково-дослідного інституту бурової техніки «ВНДІБТ» м. Москви (грудень 1966 – червень 1969), а після захисту дисертації 10 років завідував відділом промислових випробувань цього ж інституту.

У липні 1976 був запрошений на роботу до Івано-Франківського інституту нафти і газу (нині Національний технічний університет нафти і газу), де працював проректором з наукової роботи (1976-1984), завідувачем кафедр прогресивних технологій нафтогазовидобування (1984-1991); деканом факультету підвищення кваліфікації (1988-1991), завідувачем кафедри «морські нафтогазові споруди» (1993 до 2010.), деканом спільного факультету нафтогазових технологій (у Криму). З 2010 до квітня 2014 року був радником Голови правління ДАТ «Чорноморнафтогаз».

Захистив у 1969 р. кандидатську дисертацію «Исследование усталостной прочности стенок скважин с учетом температурных условий, возникающих при бурении», у 1982 р. докторську дисертацію «Совершенствование технологии освоения скважин путем управления состоянием приствольной зоны».

З 1992 року академік Української нафтогазової академії (УНГА) і її віце-президент, іноземний член Російської академії природничих наук ім. В.Вернадського (1997), дійсний член Білоруської гірничої академії (1999), член Наукового товариства ім. Шевченка (НТШ) (1999), дійсний член НТШ (2002).

Впродовж 27 років (з 1978 р.) очолював Івано-Франківську обласну організацію наукових та інженерних товариств, 14 років був Головою опікунської спостережної ради Української гімназії в м. Івано-Франківську (1990-2002), був першим керівником та організатором Івано-Франківського відділення НТШ (1999-2003).

Яремійчук Роман Семенович – був членом двох спеціалізованих рад з захисту кандидатських і докторських дисертацій (в м. Івано-Франківську та м. Києві, пізніше в м. Івано-Франківську та м. Сімферополі), входив до складу експертної ради ВАК України, входить до складу редакційних рад чотирьох наукових журналів в Україні, член редколегії журналу «Азербайджанское нефтяное хозяйство» та член редколегії газети «Кримська світлиця», член колегії Державної комісії України по запасах корисних копалин.

Під науковим керівництвом Р.С. Яремійчука захищено 20 кандидатських та дві докторські дисертації.

Яремійчук Р.С. автор та співавтор 61 книги, серед яких монографії, довідники, енциклопедії, двомовні словники, з яких 36 українською мовою брошури, підручники та навчальні посібники з грифом Міністерства освіти та науки України (МОНУ), виданих в Україні, Росії, США і Польщі, понад 300 наукових статей, 167 винаходів, більше 100 публікацій у газетах та громадсько-політичних журналах.

Рецензував безліч книг (підручників, енциклопедій, монографій), виданих в Івано-Франківську, Львові, Чернівцях, Києві, Донецьку, Мінську та Тюмені.

Нагороджений медаллю «За открытие недр» (1988), медаллю імені Лучицького «За відкриття надр» (1996), грамотою Президії Верховної Ради УРСР (1978), має 13 золотих,

срібних та бронзових медалей ВДНГ СРСР, 7 дипломів 1-го та 2-го ступенів ВДНГ УРСР, Срібною медаллю ім. Вернадського Російської академії природничих наук (РАПН). Є лауреатом конкурсу за кращу наукову роботу Мінвизу СРСР (1981), лауреатом конкурсу Мінвизу УРСР (1982) за цикл робіт, опублікованих у двох монографіях, лауреатом конкурсів УНГА (1996, 2000) за підручники з грифом МОНУ, пам'ятним знаком «Гвардія революції» (2005).

Почесні звання: заслужений діяч науки УРСР (1988), почесний нафтовик СРСР (1986), почесний працівник «Укргазпрому» (1993), заслужений працівник ДАТ «Чорноморнафтогаз» (2005).

Ось такий життєвий шлях доктора технічних наук, професора, академіка і віце-президента Української нафтогазової академії Яремійчука Р.С., того, хто ніколи не задрить досягненням інших й намагається допомагати тим, хто потребує його допомоги, хто самовіддано працював і працює так, як привчили його батьки ще з дитинства. Тому далеко не кожна людина, досягнувши поважного віку, може пишатись більшими, ніж у шановного ювіляра досягненнями.

Знають професора Яремійчука Р.С. не тільки в Україні, але й поза її межами як видатного фахівця, науковця, Учителя з великої літери. Сподіваємось, що ми ще довго будемо відчувати радість і задоволення від спілкування з цією непересічною особою.

Бажаємо Вам, Романе Семеновичу, доброго здоров'я, благополуччя та довгих років активного життя!

**МНОГАЯ ЛІТА!**

*Друзі, колеги по роботі,  
редакція журналу*

