

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ІВАНО-ФРАНКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
НАФТИ І ГАЗУ

**ЧЕРНОВА МИРОСЛАВА ЄВГЕНІЇВНА**

УДК 622.24

**РОЗВИТОК НАУКОВИХ ОСНОВ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ  
БУРІННЯ ГЛИБОКИХ ПОХИЛО-СКЕРОВАНИХ СВЕРДЛОВИН  
(для умов нафтогазових родовищ України)**

**05.15.10 – Буріння свердловин**

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**  
**дисертації на здобуття наукового ступеня**  
**доктора технічних наук**

**Івано-Франківськ-2019**

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу Міністерства освіти і науки України.

**Науковий консультант:** доктор технічних наук, доцент  
**Кунцяк Ярослав Васильович,**  
ПрАТ «НДІ КБ бурового інструменту»,  
м. Київ, генеральний директор

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, с.н.с.  
**Бондаренко Микола Олександрович.**  
Інститут надтвердих матеріалів ім. В. Н. Бакуля  
НАН України, м. Київ, зав. лабораторією  
бурового і породоруйнуючого інструменту

доктор технічних наук, професор  
**Судаков Андрій Костянтинович,**  
НТУ «Дніпровська політехніка»,  
м. Дніпро, професор кафедри  
нафтогазової інженерії та буріння

доктор технічних наук, доцент  
**Дреус Андрій Юлійович,**  
Дніпровський національний університет імені Олеся  
Гончара, м. Дніпро, професор кафедри  
аерогідромеханіки та енергомасопереносу

Захист відбудеться «29» листопада 2019 р. о 14<sup>15</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 20.052.02 при Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу за адресою: 76019, Україна, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15.

З дисертацією можна ознайомитися в науково-технічній бібліотеці Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу за адресою: 76019, Україна, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15.

Автореферат розіслано «26» жовтня 2019р.

Учений секретар спеціалізованої  
вченої ради, кандидат технічних  
наук, доцент

І. М. Ковбасюк

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Обґрунтування вибору теми дослідження.** На сучасному етапі розвитку України одним із важливих завдань є забезпечення державних потреб енергоносіями. Без вирішення цього завдання стабілізація економіки та соціальний розвиток держави є неможливим.

За часів СРСР на теренах України здійснювались інтенсивні геологорозвідувальні роботи, які дали можливість засвідчити, що поклади нафти і газу в надрах України є достатньо великими, але через великі глибини залягання вуглеводнів їх видобування було нерентабельним, оскільки дешевою альтернативою стали розвідані родовища Сибіру.

Володіючи достатніми запасами вуглеводнів на великих глибинах залягання та великою кількістю залишкових об'ємів сировини у старих експлуатованих родовищах, Україна може стати енергетично незалежною державою.

Останні дані свідчать, що добові дебети з надглибоких, понад 5 тис. м, свердловин інколи сягають  $1\div 1,5$  млн. м<sup>3</sup>, що підтверджено під час розбурювання надглибоких свердловин Мачухського та Семиренківського родовищ підприємствами «ДТЕК».

Водночас через щільність населених пунктів, рельєфи та різні об'єкти інфраструктури в Україні існує велика проблема з відведенням землі під бурові площадки. Через це переважна кількість глибоких свердловин проєктуються похило-скерованими (ПС) або з горизонтальним закінченням (ГС), що одночасно суттєво підвищує їх продуктивність під час експлуатації.

Питання успішного буріння свердловин на великі глибини, як і питання буріння похило-скерованих свердловин, є надзвичайно складними та передбачають особливі вимоги до технології буріння, технічних засобів і компоновок низу бурильної колони (КНБК).

Дослідженню та вирішенню проблем буріння таких свердловин присвячено багато робіт вітчизняних та зарубіжних науковців, зокрема Алієва М. А., Аскерова В. Б., Агаєва Г. Х., Балденко Д. Ф., Битто Р., Безухова Н. І., Булатова А. І., Васька І. А., Григоряна А. М., Глушича В. Г., Іоанесяна Р. А., Каррисона Х., Краузе К., Крижанівського Є. І., Крилова В. І., Козлова А. В., Коцкулича Я. С., Кунцяка Я. В., Лехницького Г. С., Мессера А. Г., Мислюка М. А., Морра В., Оганова Г. С., Оганова О. С., Поваліхіна А. С., Саковича Е. С., Сьювелла М., Тахауттінова Ш. Ф., Фурментро Д., Чернова Б. О., Чудика І. І., Хісамова Р. С., Хузіної Л. Б., Ясова В. Г. та ін.

Однак проблеми, що виникають внаслідок одночасного поєднання впливу особливостей глибокого буріння і особливостей похило-скерованого буріння на ефективність буріння свердловин розглянуті недостатньо. Це, здебільшого, стосується екстремальних умов роботи бурильних і обсадних колон та їх різьбових з'єднань на великих глибинах в похило-скерованих ділянках свердловин та ефективності доведення осьового навантаження на вибій. Такі обставини призводять до підвищеної аварійності бурильних та обсадних колон, а також до обмеження і зменшення швидкості буріння.

Таким чином, дослідження та вирішення проблем підвищення експлуатаційних характеристик бурильних і обсадних колон та засобів доведення осьового навантаження на вибій під час буріння глибоких і надглибоких похило-скерованих свердловин є своєчасним і актуальним завданням.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Результати наукових досліджень, конструкторських та дослідно-промислових робіт тісно пов'язані між собою і виконані згідно з Державними національними програмами «Нафта і газ України до 2010 року» (реєстраційний №019), «Національна енергетична програма України до 2010 року» (реєстраційний №025), держбюджетна науково-дослідна робота ІФНТУНГ 2015-2017 рр. «Науково-організаційні засади нарощування видобутку вітчизняних нафти і газу, їх транспортування та диверсифікації постачання для підвищення енергетичної безпеки України» (реєстраційний №0115 U 007099).

Дисертаційна робота споріднена з комплексом досліджень, що проводили ДП «Науканафтогаз» НАК «Нафтогаз України».

Під час виконання роботи авторка співпрацювала з провідними фахівцями ПрАТ «НДКБ Бурового інструменту», Інститутом надтвердих матеріалів ім. В. Н. Бакуля НАН України, Інститутом проблем міцності ім. Г. С. Писаренка НАН України та НУОУ ім. Івана Черняхівського.

**Мета і завдання дослідження** – розроблення та впровадження комплексу високоефективних технічних засобів, пристроїв і технологій підвищення ефективності роботи колони бурильних труб (БТ), компонування низу бурильної колони (КНБК) та збільшення швидкості буріння глибоких похило-скерованих нафтогазових свердловин на родовищах України.

Основні завдання досліджень:

1. Узагальнити та систематизувати промислові дані вітчизняних наукових досягнень з підвищення ефективності роботи колон БТ та КНБК за умов буріння глибоких похило скерованих ділянок стовбура свердловин.

2. На підставі принципу математичного моделювання оцінити довговічність елементів бурильної колони; дослідити динаміку рідин у затрубному просторі та вплив коливань на динаміку бурильної колони.

3. Розробити технічні засоби, пристрої та технології підвищення довговічності елементів бурильної колони.

4. Створити нові засоби, технології та пристрої задля запобігання явищам прихоплення бурильної колони та підвищення ефективності доведення осьового навантаження у вибій свердловини, щоб підвищити швидкість буріння глибоких похило скерованих свердловин й оцінити адекватність результатів досліджень шляхом їх практичного впровадження.

5. Розробити керівні документи, застосування яких сприяло б підвищенню швидкості буріння глибоких похило-скерованих свердловин на нафтогазових родовищах України.

Зазначені теоретичні, експериментальні та промислові дослідження становлять цілісний науково обґрунтований техніко-технологічний комплекс для буріння глибоких похило-скерованих а також відновлення ліквідованих та малодобітних свердловин.

*Об'єктом дослідження є глибокі похило скеровані свердловини, що бурять на нафтогазових родовищах України.*

*Предметом дослідження є замкові різьбові з'єднання (ЗРЗ), бурильні й обсадні колони, елементи КНБК та спеціальні технічні засоби для буріння глибоких похило скерованих ділянок стовбура свердловин.*

**Методи дослідження.** Комплексне застосування фізичного, математичного та комп'ютерного моделювання об'єктів досліджень для доведення адекватності отриманих результатів у лабораторних та промислових умовах. Основні положення дисертаційної роботи становлять наукову новизну. Сформульовані висновки та рекомендації є науково обґрунтованими на основі математичного аналізу, методів теорії груп та диференціальних рівнянь, статистичних методів фізичного аналізу обробки результатів експериментальних та промислових досліджень.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає у встановленні закономірностей в особливостях буріння глибоких похило-скерованих нафтогазових свердловин за складних гірничо-геологічних умов на основі комплексних теоретичних, експериментальних та промислових досліджень задля підвищення ефективності їх будівництва, зокрема:

1. Удосконалено наукові основи оцінювання довговічності елементів бурильної колони із врахуванням теорії нелінійності та основ критеріїв механіки руйнування.

2. Вперше визначено вплив коливань на властивості гідродинамічних циркуляційних процесів промивальної рідини та динаміку бурильної колони під час буріння глибоких свердловин.

3. Вперше виконано математичне обґрунтування та застосовано математичні моделі для розроблення конструкцій камер генераторів гідроколивачів та для визначення місця їх розташування в КНБК.

4. Вперше розроблено породоруйнівний інструмент, що безпосередньо поєднаний з генератором гідроколивачів задля збільшення швидкості буріння шляхом підвищення ефективності доведення осьового навантаження у вибій свердловини.

5. Вперше визначено вплив покриття полімерно-композиційними матеріалами елементів бурильної колони на опір рухові та запобігання їх прихопленню в глибоких похило скерованих ділянках стовбура свердловин.

6. Вперше розроблено технологію покриття полімерно-композиційними матеріалами (ПКМ) на основі фторопласту Ф4 елементів бурильної колони для умов експлуатації в глибоких свердловинах з високими термобаричними показниками.

7. Вперше на основі методу математичного моделювання, що базувався на математичних розрахунках в основі яких є співвідношення пружності та рівняння руху криволінійного елемента розроблено нову методологію конструювання концентраторів серпоподібної форми для генераторів енергії спрямованої дії з метою зміцнення поверхні різьб ЗРЗ.

8. Удосконалено конструкцію герметизуючого елемента, на основі полімеру Ф4, замкового різьбового з'єднання обсадних та насосно-компресорних труб для умов експлуатації у глибоких свердловинах з високими термобаричними показниками.

**Практичне значення одержаних результатів** визначається можливістю їх використання за умов буріння глибоких похило скерованих ділянок стовбура

свердловин, завдяки чому підвищується швидкість будівництва свердловин на нафтогазових родовищах України в умовах Дніпрово-Донецької западини (ДДЗ).

1. Розроблено серію конструкцій генераторів гідроколивань: ГГІ-2-10, ГГІ-3-10, ГГДІ-Р-11, ГГІ-ЦШ-10, ГГК-Т-11, обумовлено рекомендації щодо їх проектування, генератори виготовлено і успішно випробувано в промислових умовах.

2. На основі запропонованої конструкції компоновки низу бурильної колони та успішних промислових випробувань розроблено рекомендації стосовно технології буріння глибоких похило скерованих ділянок стовбура свердловин із застосуванням генераторів гідроколивань, щоб підвищити ефективність доведення енергії осьового навантаження долота у вибій свердловини та запобігти явищу прихоплення.

3. Запропоновано конструкцію бурового долота з генератором гідроакустичних імпульсів задля підвищення швидкості буріння та покращення очищення вибою свердловини, яке пройшло промислове випробування.

4. Розроблено рекомендації щодо проведення полімерного покриття ПКМ на основі Ф4 поверхні елементів бурильної колони щоб запобігти явищу прихоплення та втомно-корозійного руйнування за умов буріння глибоких похило-скерованих ділянок стовбура свердловин. Розроблено методику технологічного процесу покриття.

5. Розроблено конструкцію елемента герметизації ЗРЗ обсадних та насосно-компресорних труб для умов використання у глибоких високотермобаричних свердловинах.

6. Науково обґрунтовано вибір параметрів конструкції серпоподібного концентратора генератора енергії спрямованої дії для зміцнення різьбової поверхні замкових різьбових з'єднань (ЗРЗ).

7. Розроблено, затверджено БУ «Укрбургаз» і передано для застосування керівні документи, зокрема: «Інструкцію з отримання полімерного покриття елементів бурильної колони для запобігання явищ прихоплення в глибоких похило скерованих та горизонтально скерованих ділянках стовбура свердловин», «Інструкцію із забезпечення підвищення динамічного навантаження на долото, покращення очищення вибою свердловини під час буріння глибоких похило скерованих та горизонтально скерованих ділянок стовбура свердловин» та «Інструкцію із забезпечення герметичності обсадних колон і насосно-компресорних труб за рахунок герметизуючого полімерного вузла різьбового з'єднання для умов буріння глибоких високотемпературних свердловин».

Адекватність результатів роботи підтверджено актами проведених промислових досліджень, які засвідчили ефективність створеного техніко-технологічного комплексу та удосконаленої технології за умов буріння глибоких похило скерованих ділянок стовбура свердловин для будівництва та відновлення свердловин на родовищах України в умовах ДДЗ.

#### **Положення, що виносяться на захист.**

Системний підхід до дослідження впливу коливних процесів на динаміку бурильної колони та властивості дрібнодисперсних часток вибуреної породи у промивальній рідині задля створення методами математичного моделювання конструкції пристроїв енергії гідроколивань дипольно-прецесійного типу і на їх основі вдосконалення технології буріння глибоких похило скерованих свердловин.

Комплексні основи методології полімерного покриття елементів бурильної колони задля зменшення впливу сил тертя та запобігання явищу прихоплення в умовах буріння глибоких похило-скерованих ділянок стовбура свердловин.

Нові методи оцінювання довговічності елементів бурильної колони та створення на їх основі конструкції концентратора серпоподібної форми для генератора енергії спрямованої дії, та вдосконалення конструкції герметизуючого елементу ЗРЗ на основі Ф4 для НКТ й обсадних колон задля умов експлуатування у високотемпературних глибоких свердловинах.

**Особистий внесок здобувача.** У дисертації подано результати досліджень, які авторка виконувала самостійно або зі співавторами, зокрема з науковим консультантом д.т.н. Кунцяком Я. В. та д.т.н., проф. Черновим Б. О. З робіт, опублікованих у співавторстві, на захист виносяться тільки ті частини, які авторка виконала особисто. Роботи [2, 3, 4, 14, 15, 17, 18, 19, 23, 24, 28, 30, 32, 33, 34, 38, 42, 43, 44, 49, 50] опубліковано одноосібно.

У співавторстві проведено теоретичні, аналітичні та експериментальні дослідження пружно-деформованого стану з'єднань ОБТ [5], муфтового з'єднання обсадних і насосно-компресорних труб з елементом герметизації, що відбувається під впливом високих температур та тисків, аналогічних до свердловинних [6, 7, 10, 11, 21, 26, 30, 35].

У співавторстві проведено роботи з конструювання, розрахунку та виготовлення серії генераторів ГГІ-2-10, ГГІ-3-10, ГГІ-ЦШ-10, ГГК-Т-11 для створення гідроакустичних імпульсів [20, 22, 31, 27], зокрема особисто використано математичне моделювання задля визначення оптимальних параметрів внутрішніх камер пристрою для отримання коливань визначеної частоти [45, 47].

Особисто авторкою отримано аналітичну формулу для доцільного розміщення генераторів по довжині бурильної колони з метою протиприхоплювального впливу на елементи бурильної колони в глибокому похило скерованому стовбурі свердловини та ефективнішого доведення осьового навантаження на долото [15, 19, 24, 32, 33, 42, 43].

Особисто проведено математичне прогнозування довговічності елементів бурильної колони на основі законів нелінійної деформації [14].

Особисто авторкою проведено математичні розрахунки з розроблення конструкції серпоподібного ультразвукового концентратора енергії коливань спрямованої дії для зміцнення поверхні різьб ЗРЗ [33].

У співавторстві теоретично та експериментально досліджено вплив полімерно-композиційного покриття поверхні елементів бурильної колони на зносостійкість, довговічність, корозійно-втомне руйнування та запобігання прихопленню елементів бурильної колони в глибоких похило скерованих ділянках стовбура свердловин [27]. Розроблено технологію та рекомендації щодо нанесення ПКМ на поверхню елементів БК [18, 28, 44].

Коллективним надбанням є промислове впровадження розроблених технологій, технологічних засобів та пристроїв для буріння глибоких похило скерованих ділянок стовбура свердловин на нафтогазових родовищах України, на які отримано акти впровадження.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення наукових розробок і досліджень, що містяться в матеріалах дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на Міжнародній науковій конференції «Наука и образование» (м. Коломбо, Шрі-Ланка, 2010 р.); на IV-ій Міжнародній науковій конференції «Современные достижения в науке и образовании» (м. Будва, Чорногорія, 2011 р.); на Міжнародній науково-технічній конференції «Інноваційні технології буріння свердловин, видобування нафти і газу та підготовка фахівців нафтогазової галузі» (м. Івано-Франківськ, 2012 р.); на щорічній Міжнародній конференції «Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления» (Крим, п. Морське - 2011, 2012, 2013, м. Трускавець – 2014, 2015, 2016, 2017, 2018); на Міжнародній науковій конференції «Перспективи інновацій в науці, техніці, виробництві і транспорті 2014» (м. Одеса, 2014); на Міжнародній науково-технічній конференції «Нафтогазова освіта та наука: стан та перспективи» (м. Івано-Франківськ, 2014); на Міжнародній науково-практичній конференції «Инновационные взгляды научной молодежи» (м. Іваново, 2015, 2016); на Міжнародному симпозиумі «Научные ответы на вызов современности: техника и технологии» (м. Одеса-2016); Екогеофорум-2017 «Актуальні проблеми та інновації» (м. Івано-Франківськ-2017); на Міжнародній науково-практичній конференції «Современные направления теоретических и прикладных исследований 2017» (Іваново-2017).

**Публікації.** За матеріалами дисертації опубліковано 50 друкованих праць, з яких 21 – у періодичних фахових виданнях України, 11 – друкованих праць в іноземних виданнях та виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз, 10 патентів України; 8 тез конференцій.

**Структура і обсяг дисертації.** Дисертація складається зі вступу, шести розділів оригінальних досліджень, висновків, списку використаних джерел та додатків. Робота містить 466 сторінки з 64 рисунками, 24 таблицями, списком використаних джерел із 362 найменувань та 8 додатками.

Авторка щиро вдячна колективу ПрАТ «НДіКБ бурового інструменту», колективу Інституту надтвердих матеріалів ім. В. Н. Бакуля НАН України, колективу Інституту проблем міцності ім. Г. С. Писаренка НАН України та колективу НУОУ ім. Івана Черняхівського, науковому консультанту – д.т.н., Кунцяку Я.В., а також – д.т.н., професору Чернову Б.О. за підтримку та сприяння у проведенні наукових та промислових досліджень.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету, основні завдання та методи досліджень, висвітлено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, подано відомості про особистий внесок здобувача та апробацію результатів роботи.

**У першому розділі** на основі аналізу літературних, патентних джерел і промислових даних наведено гірничо-геологічні особливості будови нафтогазових родовищ України та на основі їх класифікації й фізико-механічних властивостей



подано характеристику основних ускладнень, що відбуваються під час будівництва глибоких похило скерованих і горизонтальних нафтогазових свердловин.

Встановлено, що геологічна будова надр на території України характеризується наявністю всіх основних типів геологічних структур континентального, а, враховуючи природу Чорноморської западини якоюсь мірою й океанічного блоків, вказане стосується і до глибинного діапазону, що підтверджують промислові притоки газу і конденсату з глибин 5,5-6,5 км у центральній частині ДДЗ (Мачухське, Семиренківське та Березівське та ін. родовища), ізотопно-геохімічні характеристики вуглеводневих систем різних нафтогазових басейнів України та інші непрямі показники.

Це дозволяє досить високо оцінювати вуглеводневий запас глибоких надр України, освоєння якого почалося менше, ніж півстоліття тому. Роботи, спрямовані на освоєння вуглеводневого потенціалу надр на великих глибинах, на сучасному науково-технічному рівні дозволять значно збільшити обсяги газовидобування в Україні та забезпечити її енергетичну незалежність.

Теоретичні дослідження та аналіз стану проблеми показали, що без розвитку наукових основ, спрямованих на вдосконалення технічних засобів, техніки і технології буріння є неможливим досягнення оптимальних значень осьового навантаження породоруйнівного інструменту для ефективного руйнування породи на вибої свердловини, що зрештою, стримує розвиток глибокого похило скерованого буріння свердловин на родовищах України.

Дослідження характеристик циркуляційних потоків та умов формування стійкого турбулентного руху потоку промивальної рідини в затрубному просторі під впливом коливних процесів мають значний вплив на реологічні властивості промивальної рідини, і в такий спосіб мають важливе значення для підвищення ефективності очищення вибою стовбура свердловини, запобігачи ускладненням, аваріям, додатковим капіталовкладенням та підвищення ефективності руйнування гірських порід.

Показано, що коливні процеси впливають на міцнісні характеристики конструкції БК, та ефективність доведення осьового навантаження у вибій свердловини, тому теоретичні, експериментальні та промислові дослідження енергії коливань, її амплітудно-частотних, фазово-частотних та резонансних характеристик мають важливе значення для успішного будівництва глибоких ПС ділянок стовбура свердловин.

Аналіз і систематизація аварій різьбових з'єднань обсадних і насосно-компресорних труб доводять необхідність їх удосконалення за допомогою нових математичних моделей для параметричних розрахунків їх конструкцій, що технологічно забезпечували б підвищену надійність та герметичність таких з'єднань в умовах експлуатування за високих тисків і температур глибоких свердловин.

У дослідженнях доведено, що 68÷76 % підведеної енергії витрачається на тертя між поверхнями та пружну деформацію породи. Недостатньо вивчено і потребують розроблення теоретичні засади та експериментальні дослідження способів зменшення сил тертя, що виникають між породою та стінками бурильної колони, підвищуючи опір переміщенню та ймовірність явищ прихоплень за умов буріння глибоких похило скерованих свердловин на родовищах України.

Зроблено висновок, що для вдосконалення техніко-технологічного комплексу і технології буріння глибоких похило скерованих свердловин є необхідними теоретичні, експериментальні і промислові дослідження для визначення ступеня впливу вказаних чинників.

На основі сучасного стану проблеми, сформульовано мету і завдання досліджень.

У другому розділі розроблено теоретично-методологічні засади математичного моделювання для прогнозування довговічності елементів бурильної колони, для дослідження напружено-деформованого стану елементів бурильної колони з урахуванням теорії нелінійності механічних систем, для дослідження напружено-деформованого стану різьбових з'єднань – теорії механіки руйнування матеріалів, для дослідження динаміки промивних рідин у затрубному просторі – статистичного методу Монте-Карло моделювання фізичних процесів.

Наведено опис розроблених стендів та конструкцій експериментальних і натурних зразків породоруйнівного інструменту, генераторів спрямованої дії для дослідження їх енергетичних характеристик, елементів компонування низу бурильної колони, зразків і вимірювального обладнання для дослідження консолідації кірки на стінках свердловини та адгезійно-міцнісних характеристик полімерного покриття, напружено-деформованого стану масиву гірських порід.

Під час встановлення функціональних залежностей, оброблення експериментальних і промислових даних та визначення енергетичних характеристик породоруйнівного інструменту, генераторів спрямованої дії, втомних характеристик КНБК, міцнісних характеристик гірської породи та полімерного покриття запропоновано методи математичного та статистичного моделювання. Наведено методологію аналітичних, експериментальних і промислових досліджень.

Оброблено статистичні дані на основі програмного забезпечення, яке дозволяє у повному обсязі отримувати та аналізувати необхідні характеристики й параметри.

У третьому розділі розглянуто дослідження впливу основних чинників на довговічність елементів бурильної колони.

Оскільки величина знакозмінних напружень в матеріалі БТ, що відпрацьовується на різних ділянках БК у глибоких похило-скерованих свердловинах, не є однаковою, бо максимального впливу зазнають ті ділянки, що знаходяться безпосередньо над ОБТ та нижня ділянка БК, дослідження, спрямовані на вдосконалення конструкції КНБК, щоб запобігти втомному руйнуванню її елементів за умов експлуатації є важливими.

Зокрема з врахуванням законів нелінійної деформації напруження описано системою рівнянь, що має таку структуру:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \nabla^2 \varphi - \frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} \right); & \sigma_\theta &= \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \nabla^2 \varphi - \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right); \\ \sigma_z &= \frac{\partial}{\partial z} \left( (2 - \mu) \nabla^2 \varphi - \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} \right); & \tau_{rz} &= \frac{\partial}{\partial r} \left( (1 - \mu) \nabla^2 \varphi - \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} \right); \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

де  $\sigma_r; \sigma_\theta; \sigma_z$  – елементи тензора напружень;  $\tau_{rz}$  – тензор моментних напружень;  $\nabla^2$  – оператор Лапласа;  $\mu$  – коефіцієнт Пуассона.

У цій системі не застосовують спрощення стосовно напружень, оскільки враховуємо обертально-поступальний рух як різьбового з'єднання, так і конструкції обважненої бурильної труби змінної жорсткості (ОБТЗЖ) та обважненої бурильної труби змінного моменту інерції (ОБТЗМІ), схема котрих подана на рис. 1.

Для цих конструкцій ми використовуємо варіант методу кінцевих елементів моментної схеми:

$$\left. \begin{aligned} M_1 &= \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma_z \xi d\xi = -D \frac{d^2 u}{dz^2}; & M_2 &= \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma_r \xi d\xi = -\mu D \frac{d^2 u}{dz^2}; \\ M_\theta &= \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma_\theta \xi d\xi = \mu S + \frac{Eh}{R} u; \end{aligned} \right\} (2)$$

де  $D$  – жорсткість труби, що враховується в умові:

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)} \quad (3)$$

$\sigma_r; \sigma_\theta; \sigma_z$  – елементи тензора напружень;

$\mu$  – коефіцієнт Пуассона;

$u$  – характеристика переміщення;

$R$  – внутрішнє значення радіуса елемента БК;

$S$  – площа поперечного перерізу тіла елемента БК;

$E$  – модуль Юнга;

$h$  – товщина стінки перерізу елемента БК;

$\xi$  – інтерполяційна функція, яку приймаємо для апроксимації напружень і деформацій;

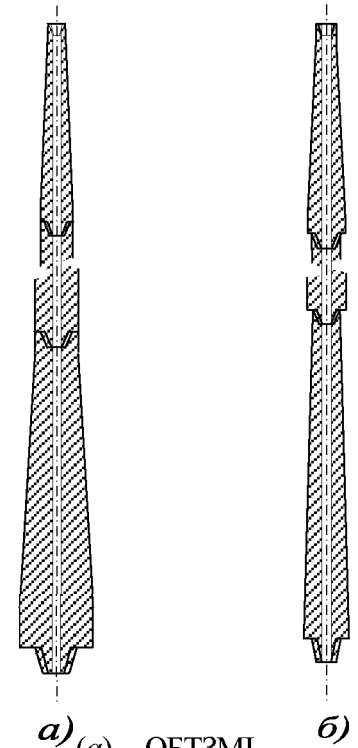
а схема типових рівнянь моментів має такий вигляд:

$$\left. \begin{aligned} \left( M_1 + \frac{dM_1}{dz} dz \right) R d\theta - M_1 R d\theta - Q r d\theta dz &= 0; \\ \left( Q + \frac{dQ}{dz} dz \right) R d\theta - Q R d\theta - N_\theta dz d\theta + p R d\theta dz &= 0, \end{aligned} \right\} (4)$$

де  $R$  та  $r$  – зовнішня та внутрішня радіальні характеристики елемента БК;  $M$  та  $Q$  – відповідно обертовий та поступальний моменти;  $N$  – модуль зсуву;  $p$  – характеристика імпульсу;

і враховують жорсткі зміщення та повністю виключають явище «фальшивого» зсуву.

У запропонованих нами ОБТЗМІ та ОБТЗЖ проблема розрахунку їх геометричної нелінійності є досить актуальною. Зв'язок між напруженнями і відповідними деформаціями прийнято у відповідність до рівнянь теорії малих



а) (а) – ОБТЗМІ,  
б) – ОБТЗЖ  
Рисунок 1 –  
Конструкції  
обважненої  
бурильної труби

пружно-пластичних деформацій, за яких (унаслідок процесу тренування) частково виконується закон Гука.

Визначали лінійну деформацію поперечного перерізу труби, що дозволило задовольнити вказані умови. Напружено-деформований стан розглядали у циліндричній системі координат  $(r, \varphi, x)$  та в декартовій  $(x_1, x_2, x_3)$ .

Збурене зовнішнє навантаження складається із симетричного й антисиметричного розподілу напружень. Симетричні відносно кута  $\varphi$  нормальні і тангенціальні напруження описують такими співвідношеннями:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r(R, \varphi, x) = \sigma_g(\varphi, x) &\cong \sum_{n=0}^M \sigma_{g,n}(x) \cos n\varphi, \\ \tau_{r,x}(R, \varphi, x) = \tau_1(\varphi, x) &\cong \sum_{n=0}^M \tau_{1,n}(x) \cos n\varphi, \\ \tau_{r,\varphi}(R, \varphi, x) = \tau_2(\varphi, x) &\cong \sum_{n=0}^M \tau_{2,n}(x) \sin n\varphi, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

де зовнішні навантаження  $\sigma_g(\varphi, x)$ ,  $\tau_1(\varphi, x)$ ,  $\tau_2(\varphi, x)$  – задані кусково-неперервними і квадратично інтегрованими функціями на поверхні циліндричного тіла.

Рівняння Ляме в переміщеннях у векторному вигляді є таке:

$$\alpha \nabla^2 \mathbf{u} + \text{grad } e = 0, \quad (6)$$

$$\text{де } \nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2}{\partial x_3^2} \text{ – оператор Лапласа; } e = \text{div } \mathbf{u} = \frac{\partial u_1}{\partial x_1} + \frac{\partial u_2}{\partial x_2} + \frac{\partial u_3}{\partial x_3} \text{ –}$$

об'ємне розширення елемента ділянки БК;  $\alpha = 1 - 2\mu$ ;  $\mu$  – коефіцієнт Пуассона;  $\mathbf{u} = u_1 \mathbf{i} + u_2 \mathbf{j} + u_3 \mathbf{k}$  – вектор пружних переміщень;  $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$  – одиничні орти декартової системи координат.

Розв'язок (6) задає деяка функція  $A$  у виді бігармонічного вектора переміщень

$$\mathbf{u} = \frac{x_3}{3 - 4\mu} \text{grad} \frac{\partial A}{\partial x_3} + x_1 \text{rot} \left( \mathbf{k} \frac{\partial A}{\partial x_2} \right) - x_2 \text{rot} \left( \mathbf{k} \frac{\partial A}{\partial x_1} \right), \quad (7)$$

або у спрощеному вигляді:

$$\mathbf{u} = \frac{x_3}{3 - 4\mu} \text{grad} \frac{\partial A}{\partial x_3} - \frac{\partial A}{\partial x_3} \mathbf{k}. \quad (8)$$

Основний напружено-деформований стан задаємо граничними навантаженнями на бічні поверхні циліндричного тіла у такому вигляді:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r(R, \varphi, x) &= g + \frac{\sigma(1 + \cos(2\varphi))}{2}, \\ \tau_{r,x}(R, \varphi, x) &\equiv 0, \\ \tau_{r,\varphi}(R, \varphi, x) &= \frac{\sigma \sin 2\varphi}{2}, \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

де  $\sigma = \frac{P}{4Rh}$ ;  $g$  – зовнішні тиски пружного навантаження бічної поверхні, розподілені довільно у напрямі осі  $x_1$ ;  $P$  – зусилля розподілені довільно у напрямі осі  $x_1$ .

Після виділення основного навантаження залишається збурене зовнішнє навантаження. Компоненти вектора пружних переміщень у циліндричній системі координат мають такий вигляд:

$$\left. \begin{aligned} u_r &= \frac{\partial \Psi}{\partial r} + \frac{\partial Q}{r \partial \varphi} + x \frac{\partial \Phi}{\partial r}, \\ u_\varphi &= \frac{\partial \Psi}{r \partial \varphi} - \frac{\partial Q}{\partial r} + \frac{x}{r} \frac{\partial \Phi}{\partial \varphi}, \\ u_x &= \frac{\partial \Psi}{\partial x} + x \frac{\partial \Phi}{\partial x} + (3 - 4\mu)\Phi, \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

де  $\Psi, \Phi, Q$  – три незалежні гармонічні функції, що залежать від трьох циліндричних координат  $(r, \varphi, x)$ .

У моделюванні роботи вузлів обважнених бурильних труб і дослідженні еволюції їх напружено-деформованого стану під час навантаження за умов, максимально наближених до реальних, використано метод інтегрування за параметром навантаження та переміщення за принципом найменшої роботи, і у вираз для потенціальної енергії враховано не компоненти напружень, а компоненти деформації, тобто:

$$\varepsilon = G \iiint \left[ \varepsilon_x^2 + \varepsilon_y^2 + \varepsilon_z^2 + \frac{\mu}{1-2\mu} \theta^2 + \frac{1}{2} (y_{xy}^2 + y_{yz}^2 + y_{zx}^2) \right] dx \cdot dy \cdot dz. \quad (11)$$

Тоді компоненти деформації легко виразити через компоненти зміщення за допомогою системи рівнянь Коші, які враховують відносно лінійне видовження і відносний лінійний зсув у циліндричних координатах.

На рис. 2 наведено розподіл напружень вздовж тіла ОБТ, де криві *a*) стосуються труб змінного моменту інерції ОБТЗМІ-178x203, *б*) змінної жорсткості ОБТЗЖ-178x203, *в*) звичайної ОБТ-178x203.

На рис. 2 суцільні лінії стосуються експериментальних результатів, отриманих за натурними зразками в лабораторних умовах, штрихові лінії отримані за розрахунками вищенаведеного методу. Найбільш рівномірним є розподіл напружень по тілу ОБТЗМІ. Умови навантаження були

однаковими  $\sim 10^6$  Н.

Графічні залежності, отримані з допомогою комп'ютерної

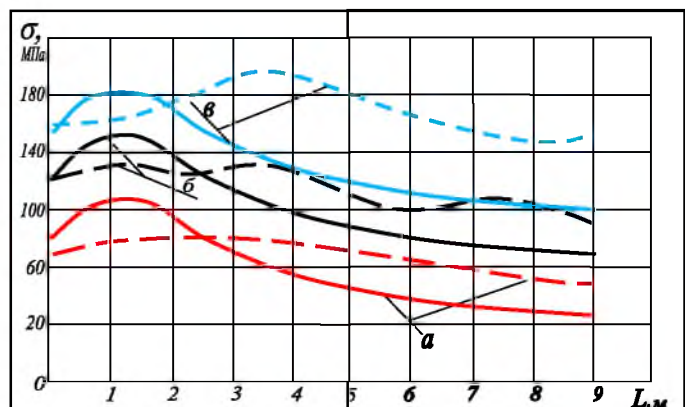


Рисунок 2 – Розподіл напружень по тілу обважненої бурильної труби

програми та застосований метод довели їх добру узгодженість з отриманими експериментальними результатами, які базувалися на результатах циклічних навантажень окремих елементів бурильної колони, отриманих в лабораторних умовах свого часу за натурними зразками.

Отримані характеристики є ідеальними, та однаково характеризують розподіл напружень по довжині, а залежності, отримані методом математичного моделювання, враховують складну геометрію поверхні труб.

За цією методикою отримуємо порівняльні характеристики для обважнених бурильних труб різного сортаменту (140x178, 178x203, 203x243) задля прогнозування довговічності ЗРЗ, конструкцій ОБТ та КНБК.

*Вплив коливальних явищ* під час буріння глибоких похило-скерованих свердловин не є до кінця вивченим, тому потребує досліджень. Під час руйнування гірської породи породоруйнівним інструментом у бурильній колоні виникають високочастотні та низькочастотні коливання. Природа і високочастотних, і низькочастотних коливань, що виникають за умов буріння глибоких похило скерованих ділянок стовбура свердловин, є складною та мало вивченою.

Практичний інтерес становить процес поширення коливань, збуджених породоруйнівним інструментом у вибої свердловини, вздовж бурильної колони та в перехідних ділянках між елементами бурильної колони. Існування дисипації енергії в середовищі, окрім повільного наростання амплітуди в біжучій хвилі, може спричинити зміщення вузлів. Тому ми дослідили перерозподіл потенціальної енергії у вузлових зонах. Коефіцієнт поглинання  $\gamma$ , що входить у комплексне хвильове число, дозволяє врахувати розподіл потенціальної енергії у вузлових зонах хвильового фронту. Для цього застосували рівняння коливань потенціалу швидкості такого типу:

$$\Phi = A \sum_{n=1}^{\infty} \varepsilon_n i^n \frac{\sin n \alpha_m}{n \alpha_m} J_n(\aleph r_0) \cos n \alpha_0, \quad (12)$$

де  $A = \nu_0 \sqrt{\frac{2f}{\pi k}} \exp\left(\frac{i\pi}{4} - ikf\right)$ ;  $\varepsilon_n = 1$  за  $n = 0$  і  $\varepsilon_n = 2$  за  $n \neq 0$ ;  $J_n(\aleph r_0)$  – функція Бесселя  $n$  – го порядку;  $\alpha_m$  – кут розкриття циліндричного хвильового фронту;  $\theta_m$  – кут розкриття сферичного хвильового фронту;  $\theta_0$  – сферична координата точки спостереження з полюсом в геометричному фокусі;  $\nu_0$  – амплітуда швидкості коливань на віддалі  $f$  від центра кривизни поверхні;  $r_0$  і  $\alpha_0$  – полярні координати точки спостереження з початком координат у центрі кривизни поверхні.

Вплив явища поглинання в середовищі на хвильовий фронт сферичної форми базується на потенціалі швидкості хвилі, що має такий вигляд:

$$\Phi = 2\pi B \int_0^{\theta_m} \exp(i\aleph R_0 \cos \theta_0 \cos \theta) \times J_0(\aleph R_0 \sin \theta_0 \sin \theta) \sin \theta d\theta, \quad (13)$$

де  $B = \left(\frac{\nu_0 f}{2\pi}\right) \exp(-ikf)$ ;  $R_0$  та  $\theta_0$  – сферичні координати точки спостереження з початком координат (полюсом) у центрі кривизни поверхні

(елемента БК);  $\theta_m$  – кут розкриття сферичного хвильового фронту, як і у випадку фронту циліндричної хвилі (рис. 3).

За результатами досліджень отримали висновок про те, що в дисипативних середовищах вузли хвильового фронту циліндричних і сферичних хвиль зміщуються на величину  $z_1$ , яка є пропорційна до коефіцієнта поглинання середовища, а також, що зміщення вузлів хвильового фронту зростає зі зменшенням кута розкриття цього хвильового фронту. Результати досліджень засвідчили, що в циліндричних хвильових фронтах низької інтенсивності зміщення зони вузлів є обернено пропорційним четвертому степеню кута розкриття, а в сферичних – зміщення центра кривизни хвилі є обернено пропорційним до квадрата кута розкриття фронту хвилі.

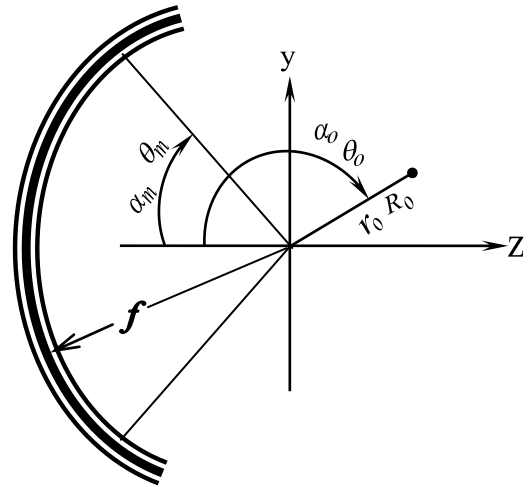


Рисунок 3 – Проекція фронту хвилі на площину вісі  $x$

Застосовування математичної моделі з такими розрахунками, дало картину поширення хвильових фронтів у кожному з елементів компоновки низу бурильної колони. Оскільки є зміщення центрів кривизни фронту хвилі ( $z$ ) у кожний наступний момент часу, то зміщуються і максимальні значення амплітуди низькочастотних коливань, від яких залежить значення потенціальної (і повної) енергії цих коливань. Це водночас викликає накладання хвиль у кожному окремо взятому елементі компоновки низу бурильної колони, для якого фронт хвилі є різним.

Враховуючи швидкість поширення низькочастотних коливань у тілі елементів КНБК, встановили межі зміщення  $z$  - вузлів хвильового фронту, які складають  $(0,7 \div 0,8)\lambda$ . Тому потік енергії низькочастотних коливань, що переноситься вздовж тіла КНБК, зазнає загасань ще до межі переходу між ділянками цих елементів.

Обґрунтування застосування такої математичної моделі полягає у тому, що за розрахунками поширення хвильового фронту в елементах БК, залежно від частотного діапазону, можна розрахувати за вузлами хвильового фронту межі загасання хвиль. Підбір в КНБК елементів відповідної довжини, водночас дасть можливість мінімізувати негативний впливу низькочастотних коливань, що поширюються вздовж тіла БК під час буріння глибоких ПС ділянок стовбура свердловин за певних геологічних умов.

Відомо, що сили прихоплення між стінками свердловини та бурильної колони залежать від сукупності сил, що зумовлені перепадом тиску промивальної рідини, липкістю кірки поверхні стовбура свердловини, коефіцієнтом тертя.

Досліджуючи способи боротьби з прихопленнями під час буріння свердловин, встановили, що для запобігання прихоплень бурильних колон використовують такі

засоби: додавання в промивальну рідину різноманітних змащувальних добавок, нанесення спеціального покриття на зовнішню поверхню бурильних труб та використання захисних пристроїв, що встановлюють на колоні бурильних труб навпроти прихопле-небезпечного інтервалу в свердловині. Але їх використання не є вдалим в одних випадках через високу собівартість, в інших – через екологічну загрозу, яку вони несуть, або через низьку ефективність їх застосування. Для цього можна використати покриття елементів бурильної колони полімерно-композиційними матеріалами (ПКМ).

За математичними моделями, де певні фізичні процеси моделюються потенціалом безвихрового векторного поля, де неперервні функції декартових координат є сталі, змішана крайова задача для основного стаціонарного поля є такою:

$$\operatorname{div} \Lambda(z) \operatorname{grad} \theta(z) = 0, \quad z \in \Omega, \quad (14)$$

$$\theta(z) = p(z), \quad z \in \Gamma_1, \quad \Lambda(z) \frac{\partial \theta(z)}{\partial \vec{n}} = -q(z), \quad z \in \Gamma_2, \quad (15)$$

де  $\Lambda(z) = 1 + \sum_{k=1}^K a_k \lambda_k(z) \chi_k(z)$  ( $z \in \Omega$ );  $\lambda_k(z)$  – якісна характеристика середовища в  $\Omega_k$  ( $k = \overline{1, K}$ ), для якої  $\lambda_k(z) \geq 0$ ,  $\max \lambda_k(z) = 1$ ;  $\lambda_k(z)|_{z \in \partial \Omega_k} = 0$ ;  $\chi_k(z)$  – характеристична функція області  $\Omega_k$ ;  $a_k = \operatorname{const}_k > -1$ .

Результатом проведеного розрахунку із застосуванням цієї математичної моделі є отримання спектру значень міцнісних та адгезійних характеристик, за якими проводимо вибір ПКМ, що задовольняв би вимоги.

Під час досліджень ми встановили переваги ПКМ на основі Ф4 над іншими. Його фізико-механічні властивості наведено в табл. 1.

**Таблиця 1 – Фізико-механічні властивості фторопласту Ф4**

№п/п	Показники	Ф4
1	Густина, $\text{кг}/\text{м}^3$	2120-2200
2	Руйнівне напруження під час розтягування, $\text{МПа}$	14,7-34,5
3	Відносне видовження під час розриву, %	250-500
4	Модуль пружності під час стиску, $\text{МПа}$	686,5
5	Модуль пружності під час розтягу, $\text{МПа}$	410
6	Твердість (за Бринелем), $\text{МПа}$	29,4-39,2
7	Коефіцієнт теплопровідності, $\text{Вт}/(\text{м} \times \text{К})$	0,25
8	Питома теплоємність, $\text{кДж}/(\text{кг} \times \text{К})$	1,04
9	Теплостійкість (за Віка')	110
10	Водопоглинення (за добу), %	0,00
11	Коефіцієнт тертя ковзання по сталі	0,003

Високоеластична деформація характеризується не лише кінетикою, а має й енергетичний характер, що визначає подолання потенціальних бар'єрів внутрішнього обертання, у такий спосіб ця залежність описана емпіричним рівнянням Муні-Рівліна:



$$\sigma = \left( \frac{RT\rho}{M_e} + AD^{-1} \right) \left( 1 - D^{-2} \right) \quad (16)$$

де  $A$  – константа для даного ПКМ, Дж/моль·м<sup>3</sup>.

Застосовуючи розроблені пристрої та обладнання ми дослідили зношувальність та адгезійність обраного ПКМ. Під час досліджень силу тертя між стінками стовбура свердловини та полімерним покриттям розглядали з точки зору рівняння Дерягіна:

$$F = \mu(F_M + F_A), \quad (17)$$

де  $\mu$  – коефіцієнт тертя;  $F_M$  – механічна складова, зумовлена дією перепаду тиску, Н;  $F_A$  – адгезійна сила взаємодії поверхні труб з поверхнею кірки стовбура свердловини, Н.

Консолідація кірки стовбура свердловини описана диференціальним рівнянням Терцагі:

$$\frac{\partial P_f}{\partial t} = C_g \frac{\partial^2 P_f}{\partial x^2}, \quad (18)$$

де  $C_g$  – коефіцієнт консолідації,

розв'язок якого за відповідних граничних умов має такий вигляд:

$$P_f(x, \tau) = \frac{8}{\pi^2} \Delta P \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{(2n-1)^2} \exp \left[ -(2n-1)^2 \cdot N \tau \right] \sin \left[ \frac{(2n-1)\pi x}{2L} \right], \quad (19)$$

де

$$N = \frac{\pi^2}{4} \tau = \frac{\pi^2 k \cdot t}{4\eta \cdot m_g L^2}; \quad (20)$$

тут  $k$  – проникність кірки поверхні стовбура свердловини, %;  $\eta$  – в'язкість фільтрату промивальної рідини, Па·с;  $m_g$  – показник ущільнення кірки, кг/м<sup>2</sup>;  $L$  – товщина кірки стінки свердловини, мм;  $t$  – час, с;  $C_g$  – коефіцієнт консолідації;  $\Delta P = P_T - P_0$  – різниця тисків, Па;  $P_T$  – гідравлічний тиск, Па;  $P_0$  – тиск біля стінки свердловини, Па;  $\tau$  – фактор часу, с.

На основі досліджень міцнісно-механічних характеристик полімерного покриття провели експерименти з вибору композиту й технології полімерного покриття елементів компонування низу бурової колони. Контролювали якість покриття за такими показниками:

- 1) адгезія покриття до поверхні (за методом відшарування) ~ кН/м;
- 2) твердість ~ од. за Шором;
- 3) міцність на розрив під час розтягування ~ МПа;
- 4) відносне видовження за розриву ~ %;
- 5) термовитривалість ~ °С;
- 6) хім. витривалість (зміна маси в 50% р-ні NaCl протягом 30 год) ~ %;
- 7) витривалість у буровому розчині (без ознак відшарування) ~ діб;
- 8) зносостійкість ~ мг/год.

Результати обчислень та експериментальних досліджень наведено в табл. 2, що засвідчує переваги ПКМ на основі Ф4 над іншими. Зразок на основі Ф-4 має найкращий результат, бо володіє адгезією та коефіцієнтом тертя удвічі меншим, порівняно з металом. Коефіцієнти консолідації у зразків становили приблизно  $C_v = 1,8 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2 / \text{с}$ .

**Таблиця 2 – Коефіцієнти тертя та питома адгезійна сила полімерних покриттів за консолідації з глинистою кіркою**

Тип покриття	Коефіцієнт тертя	Питома адгезійна сила за тиску консолідації ( $\text{кг}\cdot\text{с}/\text{м}$ )							
		0,25	0,5	0,75	1,0	1,25	1,5	1,75	2,0
Ф-3М	0,047	0,019	0,021	0,029	0,032	-	0,083	0,09	-
ПНТ	0,0246	0,017	0,018	0,021	0,032	0,036	0,04	0,043	0,051
ГЕН-150	0,073	0,019	-	0,027	0,034	-	0,073	0,13	0,15
ЕД-20	0,04	0,017	0,019	0,028	0,045	0,05	0,058	0,078	0,082
ПВЕП	0,065	0,018	0,022	0,030	0,035	0,045	0,047	0,082	0,15
<b>Ф4</b>	<b>0,001</b>	<b>0,003</b>	<b>0,0037</b>	<b>0,004</b>	<b>0,0043</b>	<b>0,0044</b>	<b>0,0046</b>	<b>0,0047</b>	<b>0,005</b>
Без покриття	0,061	0,017	0,021	0,035	0,042	0,06	0,071	0,085	0,12

За аналітичними, експериментальними та промисловими дослідженнями встановили, що нанесення ПКМ на основі Ф4 на поверхню елементів компонування бурильної колони запобігає процесам прихоплення бурильної колони в глибоких похило-скерованих ділянках стовбура свердловини під час буріння та суттєво зменшує сили тертя між стінками стовбура свердловини та елементами бурильної колони. Характеристична величина зменшення цих негативних явищ становить 90%. Результати промислових досліджень наведено в шостому розділі.

У такий спосіб застосування математичних моделей з урахуванням законів нелінійної деформації та критеріїв механіки руйнування дозволяє прогнозувати довговічність елементів БК та КНБК, та засвідчило, що коливання низькочастотного діапазону не має значного впливу на елементи БК, а застосування ПКМ на основі Ф4 зменшує тертя та запобігає прихоплення БК у глибоких похило-скерованих ділянках стовбура свердловин.

**Четвертий розділ** присвячено конструктивним і технологічним методам підвищення ефективності буріння глибоких ПС свердловин.

Сьогодні існує багато пристроїв, які сприяють підвищенню ефективності буріння свердловин. У своїй різноманітності ці пристрої є такими, що за основу використовують енергію гідроколиваний.

*Отже, інтенсифікуючий вплив коливних процесів і закручених потоків на енергомасоперенесення є досить значним. Однак конструкції відомих пристроїв, є малоприсадними для буріння глибоких похило-скерованих свердловин. Розуміючи фізичний механізм генерації коливаний, можна, заздалегідь розрахувати параметри генераційних пристроїв та врахувавши геологічні умови горизонтів, керувати процесом буріння свердловини, забезпечуючи її безаварійність та підвищення швидкості будівництва.*

Для розуміння суті фізичного процесу роботи гідроакустичних пристроїв є важливим питання, де саме, в якій області зароджуються коливання і як саме вони передаються навколишньому середовищу. Тому ми на основі ряду досліджень розробили серію генераторів гідроколивань для підсилення впливу високочастотних коливань на динаміку БК. Було розроблено методику розрахування параметрів пристроїв генераторів гідроколивань.

Основою цих конструкцій є тороїдальна камера закручування потоку, фізична суть процесу полягає в тому, що камера закручування характеризується радіусом закручування  $R_k$ , довжиною камери  $L_k$ , звуженою вихідною ділянкою  $L_c$  та вихідним радіусом  $R_c$  куди через тангенційні канали потрапляє робоча рідина. Рух рідини в камері супроводжується утворенням складної структури, що містить два обертово-поступальні потоки. По периферії камери рухається так названий первинний вихор, що має в поперечному перерізі форму кільця із зовнішнім радіусом  $R_c$  та внутрішнім  $r_m$ . Центральну область займає вторинний вихор, що утворюється через залучення в рух первинним вихором потоку рідини з навколишнього середовища. Схема камери наведена на рис. 4.

Механізм цього явища полягає у тому, що коливання тиску  $\delta P$  зароджуються у порожнині вихрової камери генератора внаслідок періодичних пульсацій швидкості  $\delta v$  в первинному потоці. Це спричинюється постійними змінами форми поперечного перерізу первинного потоку вторинним вихором, що одночасно з обертовим рухом навколо власної осі, виконує прецесійний рух навколо осі камери закручування. Первинний вихор, у якому швидкість і тиск є функціями часу і кута повороту потоку, що виходить з генератора, випромінює у навколишнє середовище коливання так само, як це робило б дипольне джерело, що обертається. Якщо з якихось причин (до прикладу мале значення  $L_k$ ) вторинний

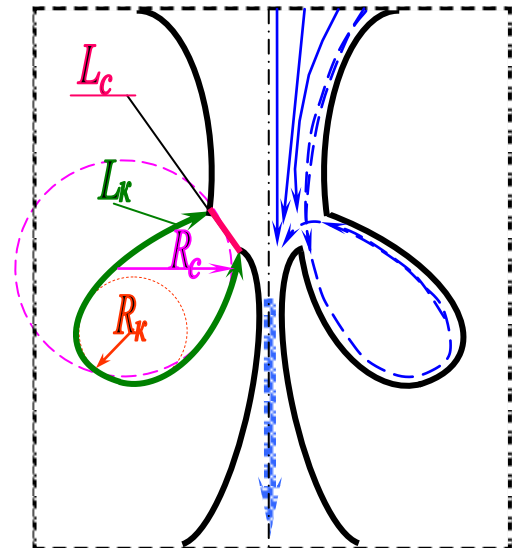


Рисунок 4 – Схема тороїдальної вихрової камери генератора гідроколивань

вихор не встигає в межах камери набути обертового руху по всьому поперечному перерізі, то прецесійний рух через мале значення збурювальних сил поперечного зміщення не зможе бути зреалізованим. Отже умови, які є необхідними для виникнення і передачі коливань, зводяться до таких:

1) однакова або близька за фізичною суттю природа робочого тіла (потоку в камері) й навколишнього затрубного середовища;

2) певна мінімальна довжина камери закручування  $L_k$ , достатня для формування вторинного вихору, який обертається за законом обертового руху твердого тіла.

Ми досліджували хвильові характеристики генератора з відкритим виходом  $R_c = R_k = 10 \text{ см}$  та з прикритим. Ступінь прикриття обчислюємо за таким співвідношенням:

$$C = \frac{R_c}{R_k}. \quad (21)$$

Відносну довжину звуженої ділянки камери визначаємо за такою залежністю:

$$\bar{L}_c = \frac{L_c}{2R_k}. \quad (22)$$

Конструкцію генератора змінювали методом математичного моделювання, описаного в роботі. Зміни стосувалися ступеня закручування потоку, який характеризується геометричним параметром  $A$  ( $A = 2; 4; 8; 16 \dots$ ) та відносної довжини камери закручування  $\bar{L}_k$ :

$$\bar{L}_k = \frac{L_k}{2R_c}, \quad (23)$$

яка змінювалася в межах  $L_k = 2 \div 5$ .

Варіації ступеня закручування потоку були у достатньо широкому діапазоні. Зі збільшенням величини  $L_k$  інтенсивність коливань зростає, досягаючи максимального значення за деякої довжини  $L_k = L_{opt}$ , після чого зменшується (рис. 5).

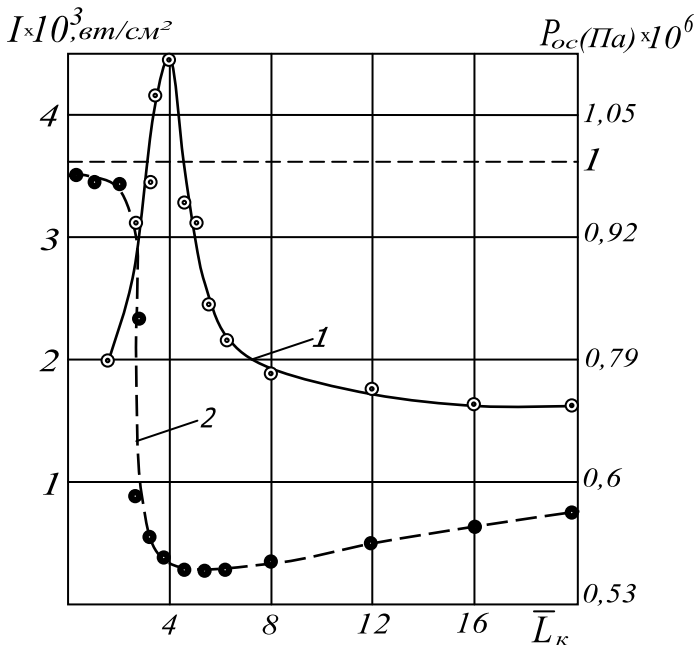


Рисунок 5 - Залежність інтенсивності коливань  $I$  (1) та тиску  $P$  (2) на осі камери від відносної довжини камери закручування

Величину параметру  $A$  визначали таким співвідношенням:

$$A = \frac{RR_c}{nr_{ex}^2}, \quad (24)$$

де  $n$  – кількість вхідних тангенціальних каналів;  
 $r$  – їх радіус.

Встановлено, що повинна існувати деяка мінімальна довжина вихрової камери  $L_{min}$ , оскільки за умови  $L_k < L_{min}$  вторинний вихор не зможе набути квазітвердого обертового руху, а, відповідно, коливання не виникнуть.

Відносна величина

$$\bar{L}_{opt} = \frac{L_k}{2R_c}, \quad (25)$$

визначається значенням геометричного параметра  $A$  і не залежить від об'ємного розходу камери.

Для дослідження фізично-механічних процесів, що відбуваються в затопленій струмині у вибої свердловини під дією гідроакустичних коливань, на основі чого можна в майбутньому прогнозувати вплив цих процесів на техніко-технологічні характеристики буріння свердловини, ми застосували математичну модель, де вихідні рівняння гідродинаміки в'язкої нестискуваної рідини є

$$\left\{ \begin{aligned} \Delta \vec{u} - \nu \Delta \mathbf{u} &= -\nabla \frac{p}{\rho_0}; & \operatorname{div} \mathbf{u} &= 0, \end{aligned} \right\}, \quad (26)$$

тут  $\mathbf{u}$  – вектор швидкості рідини;  $\nu$  – її кінематична в'язкість;  $p$  – тиск;  $\rho_0$  – густина рідини.

Течію вважали циліндрично-симетричною відносно осі  $z$ , її параметри не залежать від полярного кута.

У циліндричній системі координат для складників швидкості  $\mathbf{u} = (u \equiv u_r, w \equiv u_z)$  рівняння (26) записують так:

$$u \frac{\partial u}{\partial r} + w \frac{\partial u}{\partial z} - \nu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{u}{r^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) = -\frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{p}{\rho_0} \right); \quad (27)$$

$$u \frac{\partial w}{\partial r} + w \frac{\partial w}{\partial z} - \nu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) = -\frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{p}{\rho_0} \right); \quad (28)$$

$$\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{u}{r} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0. \quad (29)$$

Після заміни змінних рівняння в частинних похідних зводяться до звичайних диференціальних рівнянь стосовно функцій  $U, W, P$ , що залежать від однієї змінної  $\xi = \frac{r}{z}$ :

$$U \frac{dU}{d\xi} - W \frac{d}{d\xi} \left( \xi U \right) - \nu \left[ (1 - \xi^2) \frac{d^2 U}{d\xi^2} + \frac{1 + 4\xi^2}{\xi} \frac{dU}{d\xi} - \frac{1 - 2\xi^2}{\xi^2} U \right] = \frac{dP}{d\xi}; \quad (30)$$

$$U \frac{dW}{d\xi} - W \frac{d}{d\xi} \left( \xi W \right) - \nu \left[ (1 - \xi^2) \frac{d^2 W}{d\xi^2} + \frac{1 + 4\xi^2}{\xi} \frac{dW}{d\xi} + 2W \right] = -\frac{1}{\xi} \frac{d}{d\xi} (\xi^2 P); \quad (31)$$

$$\frac{1}{\xi} \frac{d}{d\xi} (\xi U) = \frac{d}{d\xi} (\xi W). \quad (32)$$

Розв'язки цієї системи рівнянь характеризують потік промивальної рідини, що проходить крізь отвори гідроакустичних генераторів.

Часткові розв'язки системи звичайних диференціальних рівнянь (30) – (32) враховують в'язкість рідини:

$$\left. \begin{aligned} U &= 2\nu\xi \frac{A - \sqrt{1 + \xi^2}}{\sqrt{1 + \xi^2} (\sqrt{1 + \xi^2} - 1)}; & W &= 2\nu \frac{A + A(1 + \xi^2) - 2\sqrt{1 + \xi^2}}{\sqrt{1 + \xi^2} (\sqrt{1 + \xi^2} - 1)}; & P &= -\frac{2\nu}{\xi} U; \end{aligned} \right\}, \quad (33)$$

де  $A$  – константа, що характеризує параметри генератора.

Граничні умови на осі записують у такому виді:

$$\frac{U(0)}{2\nu} = \frac{\xi}{A-1}; \quad \frac{W(0)}{2\nu} = \frac{2}{A-1}. \quad (34)$$

Щоб у фокальній площині хвильового фронту відбувався певний технологічний процес, як-от генерація хвильової енергії, інтенсивність коливань повинна мати значення не менше за деяку величину  $I_k$ , що називають критичною інтенсивністю процесу.

Продуктивність системи можна оцінити кількістю рідини, що проходить крізь фокальну область генератора, де інтенсивність не є меншою за  $I_k$ , поділеною на потужність коливань. Тому продуктивність генератора визначається таким співвідношенням:

$$\Pi = \frac{V_k I_k}{W}. \quad (35)$$

Якщо інтенсивність коливань на виході  $I_0$ , а площа внутрішньої поверхні камери  $S$ , то потужність коливань буде визначатися таким співвідношенням:

$$W = I_0 S. \quad (36)$$

Враховуючи, що тиски та інтенсивність пов'язані співвідношенням  $I \sim P^2$ , одержимо продуктивність генератора у виді такої рівності:

$$\Pi = \frac{V_k P_k^2}{S P_0^2}.$$

Щоб обрахувати продуктивність генератора, необхідно виразити критичний об'єм  $V_k$  через параметри генератора, а для цього слід використати вираз для розподілу потенціалу у фокальній області нашої генерувальної системи :

$$\Phi(\theta_0, r) = \nu_0 f e^{-ikf} \int_0^{\theta_m} e^{ikr \cos \theta_0 \cos \theta} J_0(kr \sin \theta_0 \sin \theta) \sin \theta d\theta, \quad (37)$$

де  $\nu_0$  – амплітуда швидкості на віддалі  $f$  від фокусу ( $m$ );  $f$  – фокусна віддаль в генераторі;  $\theta_m$  – кут розкриття генератора;  $\theta_0$  – сферичні координати точки спостереження з полюсом в центрі фокусу системи;  $J_0$  – функція Бесселя нульового порядку.

Рівність для обчислення продуктивності генератора зводиться до виразу:

$$\Pi = 16\sqrt{3}\pi\lambda^3 \frac{K_p^2 q^2 (1-q^2)^{\frac{3}{2}}}{S \Omega^2 (6\pi - \Omega)}, \quad (38)$$

звідки зрозуміло, що продуктивність генератора є обернено пропорційною до величини кута розкриття хвильового фронту  $\Omega$ .

Прикритий чи відкритий вихід камери визначається кутом розкриття хвильового фронту, оскільки оптимальна робота генератора визначається величиною критичного тиску в центрі фокусу конструкції генератора  $P_k$  та параметрами генератора – робочою частиною, фокусною віддаллю, кутом розкриття хвильового фронту та площею випромінюваної поверхні. Ці параметри тісно пов'язані між собою, і зміна одного з них веде до зміни характеристик інших.

На рис. 6 наведено дві схеми генераторів: а) різна площа камер за однакового кута розкриття хвильового фронту; б) однакова площа камер за

різних кутів розкриття хвильового фронту, у яких  $S_1$  та  $S_2$  – площі камер, а  $R_1$  і  $R_2$  – радіуси кривизни, для яких обов'язково виконується таке співвідношення:

$$\frac{S_1}{R_1^2} = \frac{S_2}{R_2^2} = \Omega. \quad (39)$$

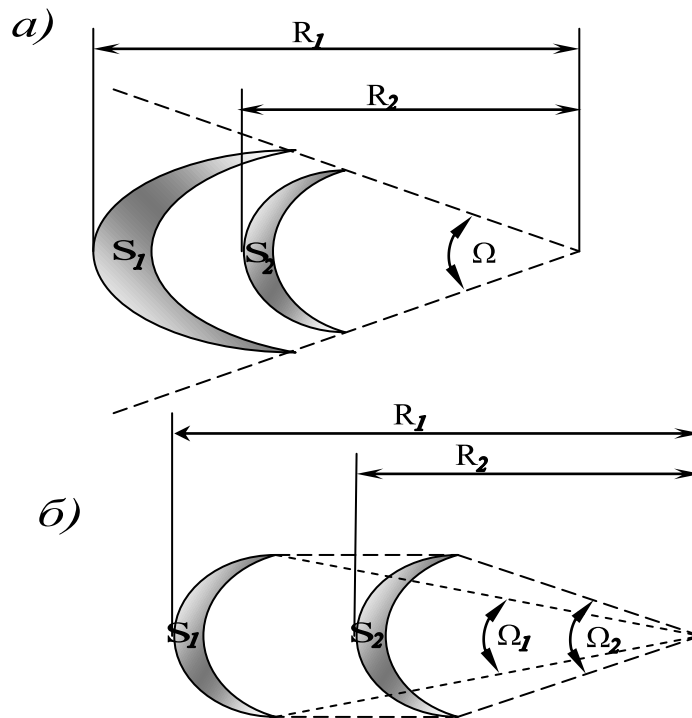


Рисунок 6 – Параметричні схеми генераторів гідроколивань

Результати досліджень наведено в таблиці 3, де у стовпці фіксованих параметрів у дужках вказано ті параметри, що залишаються не змінними через незмінність величин, що без дужок. В усіх випадках вважаємо, що хвильова потужність генератора  $W = const$ .

Таблиця 3 – Параметричні зміни продуктивності генератора

№ п\п	Параметри що змінюються	Незмінні параметри	Параметри що зазнають змін	Продуктивність генератора
1.	Збільшення $\lambda$	$S, (K_p), (P_0)$	Збільшення $\Omega$ , зменшення $f$	Зростає за $\Omega < 5$ , мало зростає за $\Omega > 5$
2.	Збільшення $\lambda$ та $S$	$\Omega$	Збільшення $K_p, f$ зменшення $P_0$	Зростає
3.	Збільшення $\lambda$ та $S$	$f$	Збільшення $\Omega, K_p$ зменшення $P_0$	Зростає за $\Omega < 5$ , мало зростає за $\Omega > 5$
4.	Зменшення $\Omega$	$\lambda, S, (P_0), (K_p)$	Збільшення $f$	Зростає
5.	Зменшення $\Omega$	$f, \lambda$	Зменшення $S, K_p$ збільшення $P_0$	Зростає

З наведених даних у табл. 3 можемо судити про те, що:

а) генератори, що мають більшу фокусну віддаль, характеризуються більшою продуктивністю, зміни, що спричиняють зменшення цієї віддалі, а відповідно – збільшення кута розкриття хвильового фронту, зменшують продуктивність генератора, а якщо збільшують, то несуттєво;

б) зміна параметрів за сталої потужності повинна забезпечувати тільки незмінним тиск у центрі фокальної площини, а коефіцієнт підсилення тиску може бути величиною змінною;

в) за використання генераторів гідроколивань є доцільним зменшувати кут розкриття до мінімально допустимої величини.

Слід зауважити, що для середовищ, що характеризуються великим коефіцієнтом поглинання, підвищувати продуктивність генератора доцільно, збільшуючи довжину хвилі та зменшуючи його фокусну віддаль.

Результати теоретичних та експериментальних досліджень сприяли створенню принципово нової конструкції породоруйнівного інструменту, що містить генератор гідроколивань у центральному промивному каналі, для буріння в неабразивних гірських породах м'якої та середньої твердості з використанням промивальних рідин із низьким вмістом абразивних додатків (рис. 7).

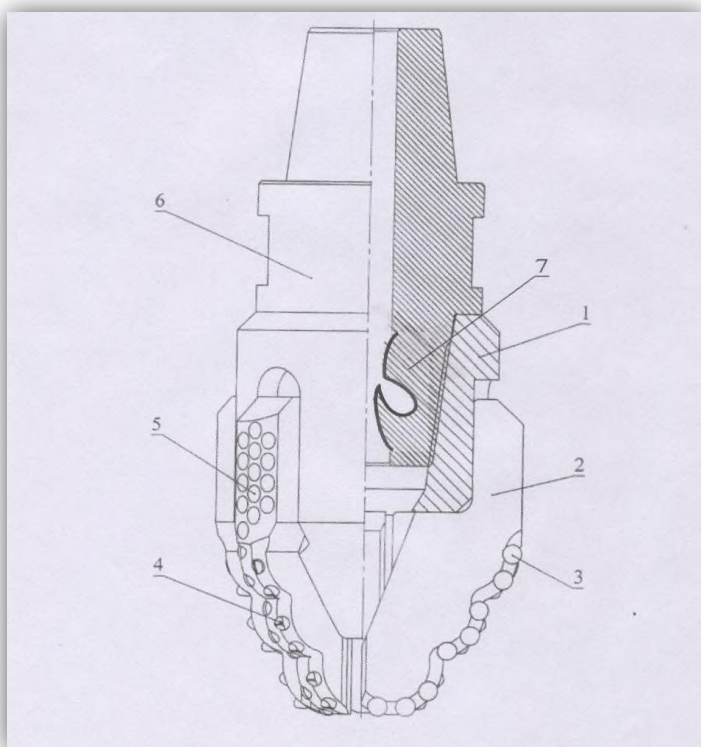


Рисунок 7 – Схема конструкції долота з генератором гідроколивань

Бурове долото з генератором гідроколивань за основу має долото АП-214,3 МС-К, розроблене свого часу експериментальним заводом ІНМ НАН України для буріння вибійними двигунами похило скерованих і горизонтальних свердловин та вдосконалене ПрАТ «НДІКБ бурового інструменту».

Метою конструкцій є покращення очищення вибою свердловини пульсуючим потоком промивальної рідини та створення додаткового динамічного осьового навантаження на вибій свердловини.

Запропонована конструкція містить корпус долота з промивальними каналами, де в центральній осьовій частині промивального отвору розміщується розроблений нами генератор гідроколивань.

конструкція якого підбирається згідно з наведеними в роботі математичними розрахунками залежно від літологічних характеристик породи, яку бурять, та техніко-технологічних режимів буріння. Така конструкція є механічно надійною, оскільки не містить рухомих деталей, а генератор підвищує швидкість потоку



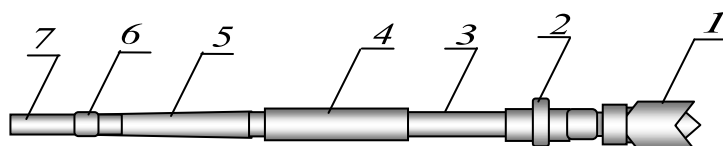
промивальної рідини, що витікає з отворів долота та створює середньочастотні або високочастотні ( $\sim 10^2 \div 10^3$  Гц) поздовжні коливання, спричинюючи додаткове динамічне осьове навантаження долота у вибої свердловини.

Враховуючи, що саме тіло бурильної колони є об'єктом виникнення сил тертя зі стінками стовбура похило-скерованої свердловини, через що зменшується ефективність доведення осьового навантаження до долота у глибоких похило-скерованих ділянках стовбура свердловини, розміщення розроблених конструкцій генераторів пропонується не лише в наддолотній частині бурильної колони, а й на певних віддальх по тілу труби.

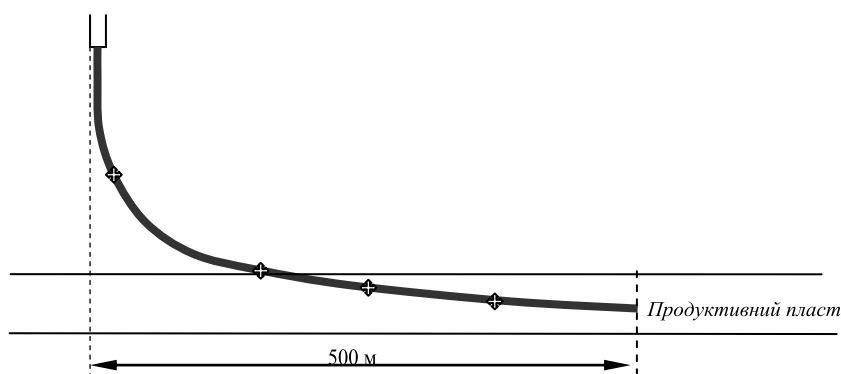
Для додаткового розміщення пристроїв генерації коливань заданої частоти слід враховувати не тільки літологічні властивості породи, що буриться, а й особливості бурильної колони, реологічні властивості промивальної рідини та ін.

Віддаль від встановленого генератора до розташування наступного між елементами КНБК у похило скерованій ділянці бурильної колони (рис. 8) обчислюємо за розв'язками такого рівняння:

$$E \cdot I(x) \frac{d^4 \Omega}{dx^4} + \frac{d}{dx} \left[ \mathbf{G} - xgm(x) \sin \alpha \frac{d\Omega}{dx} \right] - \omega^2 (\rho_m - \rho_p) S(x) \Omega = gm(x) \cos \alpha. \quad (40)$$



а



б

1 – долото, 2 – ГВД 3 – телеметрична система, 4-обважнені бурильні труби, 5 – обважнені бурильні труби змінного моменту інерції, 6 – генератор гідроколивачів, 7 – бурильні труби,

Рисунок 8 – «а» – схема загального вигляду компоновання і «б» – схема похило скерованої свердловини з можливими додатковими розміщеннями генераторів гідроколивачів

Розрахунки з використанням зазначеної КНБК проводили з врахуванням характеристик долота 215,9 МХ ЗС, генератора гідроакустичних імпульсів, гвинтового двигуна ДР-176, телесистеми типу МВД -172М1-ГК, бурильних труб із легованої сталі. Осьове навантаження приймали у 30÷90 кН, продуктивність бурових насосів враховувалася в межах 25÷30 л/с, тиск - 5,0÷7,5 МПа. Розрахунки

враховували характеристики літології України на глибинах 1500÷5500 м, яка представлена глинистими породами, аргілітами, алевролітами, пісковиками, щільними та тріщинуватими вапняками. Результати розрахунків та лабораторних досліджень стосувалися таких параметрів: механічна швидкість, проходження на долото, осьове навантаження на долото, тиск та розхід промивальної рідини.

Дослідження засвідчили, що розміщення розроблених конструкцій генераторів у КНБК та на певних ділянках бурильної колони суттєво підвищують механічну швидкість буріння (~29%) та проходження на долото (~38%). Такий результат пояснюємо ефективним доведенням осьового навантаження у вибої свердловини, зменшенням сил тертя бурильної колони зі стінки свердловини в похило скерованій та горизонтальній її частинах. Зазначимо, що вплив коливань, які поширюються в промивальній рідині, зокрема в затрубному просторі (чи поздовжні, чи поперечні), змінюють її реологічні властивості, що покращує винесення вибуреної породи на денну поверхню, забезпечуючи краще очищення вибою свердловини.

За умов буріння глибоких похило-скерованих свердловин є необхідність у підвищенні надійності та довговічності ЗРЗ елементів БК, що стало причиною створення способу зміцнення різьбової поверхні ЗРЗ.

Свого часу ми розробили генератор енергії спрямованої дії та конструкцію концентратора ультразвукових коливань для зміцнення западин різьбових з'єднань труб нафтового сортаменту. Форма концентратора була обрана емпірично, відтак для ЗРЗ за їх умов експлуатації у глибоких похило скерованих свердловинах є недосконалою. Недосконалість конструкції розробленого концентратора полягає в тому, що технологія його виготовлення передбачає формування западини різьби більшою, ніж початкова величина. Такий підхід порушує герметичність ЗРЗ за умов експлуатації.

Для одержання оптимальних параметрів зміцнення конічних ЗРЗ ми розробили експериментальний стенд, провели комплекс теоретичних та експериментальних досліджень із метою створення нової конструкції концентратора генератора ультразвукових коливань спрямованої дії. Вибір параметрів концентратора базувався на проведених математичних розрахунках, в основі яких є співвідношення пружності та рівняння руху криволінійного елемента. У прямокутній системі координат система диференціальних рівнянь зі змінними коефіцієнтами має такий вигляд:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d^2 \xi_1}{ds^2} - \frac{d\eta}{rds} + \frac{d\Omega}{\Omega ds} \left( \frac{d\xi_1}{ds} - \frac{\eta}{r} \right) + \frac{1}{r\Omega} \left[ \frac{dJ}{ds} \left( \frac{d^2 \eta}{ds^2} + \frac{\eta}{r^2} \right) + J \left( \frac{d^3 \eta}{ds^3} + \frac{d\eta}{r^2 ds} \right) \right] &= \frac{1}{c^2} \frac{d^2 \xi_1}{dt^2} \\ \frac{J}{\Omega} \frac{d^4 \eta}{ds^4} + \frac{2}{\Omega} \frac{dJ}{ds} \frac{d^3 \eta}{ds^3} + \frac{1}{\Omega} \left( \frac{d^2 J}{ds^2} + \frac{J}{r^2} \right) \frac{d^2 \eta}{ds^2} + \frac{2}{r^2 \Omega} \frac{dJ}{ds} \frac{d\eta}{ds} + \frac{1}{r^2} \left( \frac{d^2 J}{\Omega ds^2} + 1 \right) \eta - \frac{d\xi_1}{rds} &= - \frac{1}{c^2} \frac{d^2 \eta}{dt^2} \end{aligned} \right\}, \quad (41)$$

де  $c$  – швидкість розповсюдження повздовжніх хвиль;  $\Omega$  – площа поперечного перерізу відносно нейтральної лінії;  $J$  – момент інерції поперечного перерізу відносно нейтральної лінії;  $\xi, \eta$  – переміщення точки вісі стрижня відповідно по дотичному та нормальному напрямках до осі концентратора;  $s$  – криволінійна координата поперечного перерізу вдовж осі концентратора.

Розв'язком системи (41) будуть рівняння такого типу

$$\xi_1 = \xi_1(s)e^{i\omega t}, \text{ та } \eta = \eta(s)e^{i\omega t} \quad (42)$$

де  $\omega$  – кутова частота коливань.

Для визначення амплітуд поздовжніх  $\xi_1(s)$  та поперечних коливань,  $\eta(s)$  отримуємо таку систему рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} & \frac{d^2 \xi_1}{ds^2} + \frac{1}{\Omega} \frac{d\Omega}{ds} \frac{d\xi_1}{ds} + k^2 \frac{d\xi_1}{ds} - \frac{1}{r} \frac{d\eta}{ds} - \frac{\eta}{r\Omega} \frac{d\Omega}{ds} + \\ & + \frac{1}{r\Omega} \left[ \frac{dJ}{ds} \left( \frac{d^2 \eta}{ds^2} + \frac{\eta}{r^2} \right) + J \left( \frac{d^3 \eta}{ds^3} + \frac{1}{r^2} \frac{d\eta}{ds} \right) \right] = 0; \\ & \frac{d^4 \eta}{ds^4} + \frac{2}{J} \frac{dJ}{ds} \frac{d^3 \eta}{ds^3} + \left[ \frac{1}{J} \frac{d^2 J}{ds^2} + \frac{1}{r^2} \right] \frac{d^2 \eta}{ds^2} + \frac{2}{J} \frac{dJ}{ds} \frac{1}{r^2} \frac{d\eta}{ds} + \\ & + \left[ \frac{1}{r^2 J} \frac{d^2 J}{ds^2} + \frac{\Omega}{J} \left( \frac{1}{r^2} - k^2 \right) \right] \eta - \frac{\Omega}{rJ} \frac{d\xi_1}{ds} = 0; \end{aligned} \right\}, \quad (43)$$

де  $k = \frac{\omega}{c}$ .

Краєві умови на вільних кінцях концентратора  $s = 0; l$  мають вигляд:

$$F = E\Omega \left( \frac{d\xi_1}{ds} - \frac{\eta}{r} \right) = 0; \quad M = EJ \left( \frac{d^2 \eta}{ds^2} + \frac{\eta}{r^2} \right) = 0; \quad Q = EJ \left( \frac{d^3 \eta}{ds^3} + \frac{1}{r^2} \frac{d\eta}{ds} \right) = 0; \quad (44)$$

де  $F, M, Q$  – сила розтягування, момент згинання та сила згинання у поперечному перерізі відповідно;  $E$  – модуль пружності матеріалу концентратора.

Схема розрахунку для концентратора пропонованої конструкції наведена на рис. 9. Практичний інтерес має розрахунок для серпоподібного концентратора, де  $r$  – радіус вісі;  $R_1$  та  $R_2$  – радіуси кривизни (зовнішній та внутрішній);  $\delta$  – максимальна ширина;  $b_{min}$  – мінімальний радіальний розмір;  $l$  – віддаль між радіусами кривизни.

Розраховано резонансну довжину концентратора за допомогою додатку програми «MathCAD» для різних вихідних даних. Визначали три перші значення резонансної довжини концентратора, оскільки два перші значення відповідають поперечним коливанням, а третє – поздовжнім.

Зважаючи на умови роботи концентратора, ми вибрали таку його довжину, за якої мають найбільше місце поздовжні коливання. Результати цього розрахунку наведено на рис. 10, та на рис. 11 за різних частот

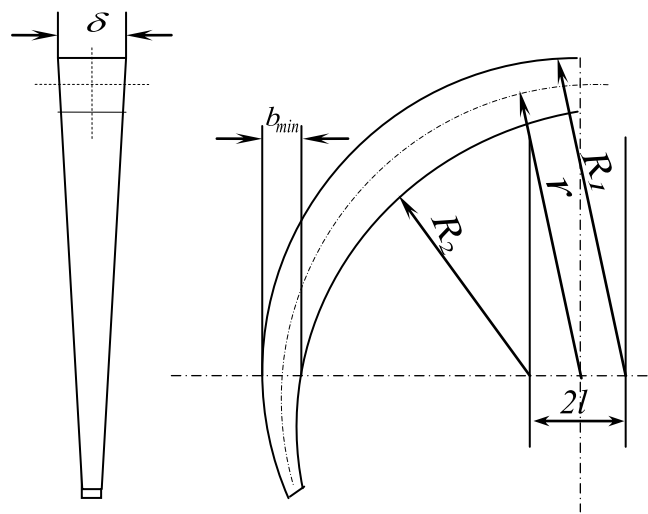


Рисунок 9 – Схема для розрахунку резонансної частоти серпоподібного ультразвукового концентратора

$$1-\nu = 18 \cdot 10^3 \text{ Гц}; \quad 2-\nu = 19 \cdot 10^3 \text{ Гц}; \quad 3-\nu = 20 \cdot 10^3 \text{ Гц}; \quad 4-\nu = 21 \cdot 10^3 \text{ Гц}; \\ 5-\nu = 22 \cdot 10^3 \text{ Гц}.$$

Оскільки, радіальний розмір  $b$  серповидного концентратора є значно меншим

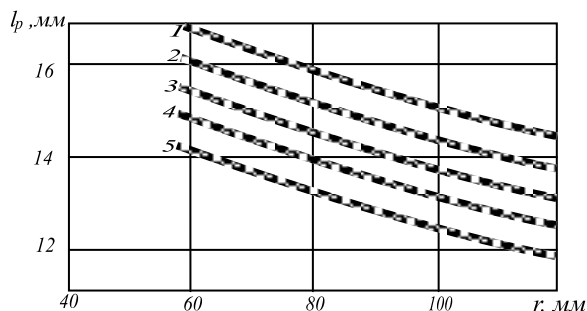


Рисунок 10 – Залежність параметра  $l$  від параметра  $r$

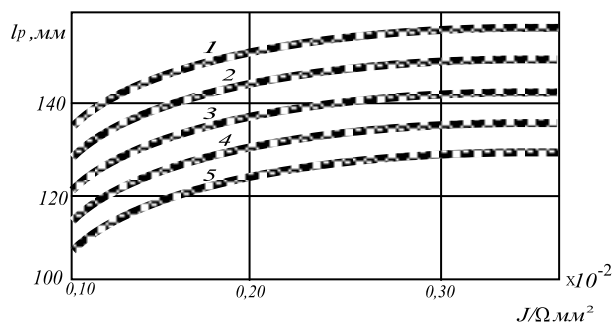


Рисунок 11 – Залежність резонансної довжини концентратора  $l_p$  від параметра  $a^2$

за радіус його осі  $r$ , то площа  $\Omega$  й момент інерції  $J$  його поперечного перерізу визначені з достатньою точністю за таким виразом:

$$\left. \begin{aligned} \Omega &= 2\delta m r \left( 1 + \frac{b_{\min}}{2mr} - \sin \frac{s}{r} \right); \\ J &= \frac{2\delta m^3 r^3}{3} \left( 1 + \frac{b_{\min}}{2mr} - \sin \frac{s}{r} \right)^3, \end{aligned} \right\} \quad (45)$$

де  $\delta, b_{\min}$  – ширина та мінімальний радіальний розмір концентратора відповідно;  $m = \frac{l}{r}$ .

Для визначення резонансної довжини концентратора застосовували додаток у програмі «MathCAD». Розрахування проводили для декількох серпоподібних концентраторів, зокрема для найбільш оптимального випадку, а саме:  $r = 8 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ ,  $b_{\min} = 0,2 l$  (рис.12) для  $m = 0,1$ ,  $b_{\min} = 0,02 r$  (рис. 13).

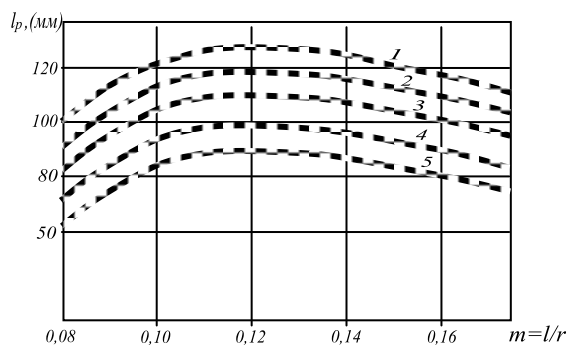


Рисунок 12 – Залежність резонансної довжини концентратора від співвідношення між основними параметрами

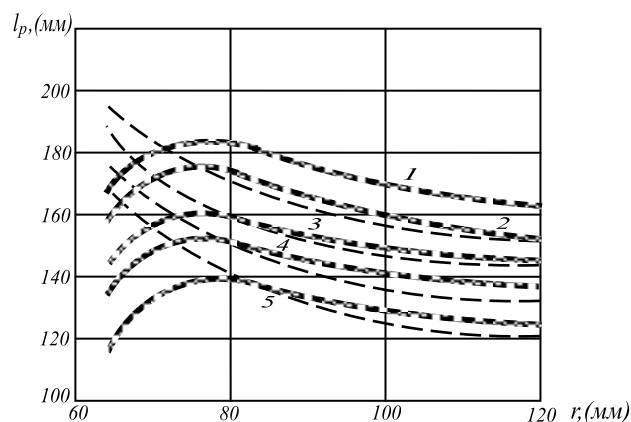


Рисунок 13 – Графік розрахунку резонансної довжини концентратора точним та наближеним способами



Отже, розроблено методологію розрахунку енергетичних параметрів генераторів гідроколивачів ГГІ-2, ГГІ-3, ГГДІ-Р, ГГК-Т з камерами різної форми для закручування потоку промивальної рідини й створення коливачів певного амплітудно-частотного діапазону, та створено породоруйнівний інструмент з генератором гідроколивачів для того, щоб підвищити ефективність доведення динамічного осьового навантаження у вибір свердловини, й методологію розрахунку параметрів концентратора генератора енергії спрямованої дії для зміцнення ЗРЗ, задля умов експлуатації у похило-скерованих ділянках глибоких свердловин.

**П'ятий розділ** присвячено підвищенню герметичності ЗРЗ обсадних та насосно-компресорних труб для застосування у глибоких свердловинах з високими термобаричними показниками.

Встановлено, що обсадні труби нафтового сортименту відповідно до ГОСТ-632-80 (ОТТМ, ОТТГ), аналогічно й насосно-компресорні труби, відповідно до ГОСТ-633-80 виготовляють з різьбою трикутного та трапецеїдального профілю. Конструктивно різьбове з'єднання з різьбою трикутного профілю не є герметичним, хоч конструкції з такими з'єднаннями до тепер випускають трубопрокатні заводи. Експериментальні дослідження натурних зразків таких з'єднань показали, що конструкція різьби безупорного типу не забезпечує високої герметичності РЗ обсадних та насосно-компресорних труб, а відповідно й нормального експлуатування свердловин.

Елемент герметизації, розроблений свого часу не є придатним для умов експлуатації у глибоких свердловинах з високими термобаричними показниками, оскільки існує ймовірність утворення з металом ЗРЗ гальванопари. Щоб вирішити цю проблему, ми дослідили вибір матеріалу, який задовольняв би умови експлуатації у вищезгаданих свердловинах.

Конструктивні параметри елемента герметизації наведено на рис. 15.

На основі аналітичних та експериментальних досліджень визначено оптимальні параметри елементів вузла герметизації, за яких є висока герметичність обсадних труб за умов експлуатації в глибоких ПС свердловинах.

Розроблено керівний документ, що встановлює основні принципи з розрахувань вузла герметизації обсадних колон та насосно-компресорних труб для підвищення їх герметичності за умов буріння глибоких свердловин, яким притаманні високі термобаричні показники.

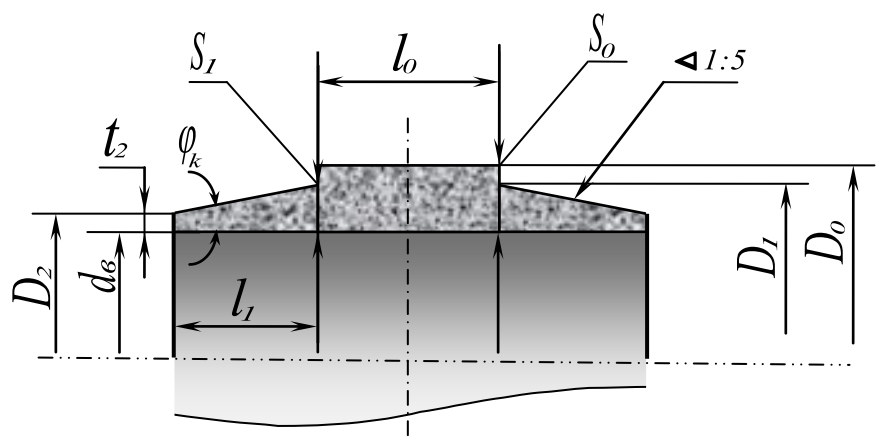


Рисунок 15 – Схема основних параметрів елемента герметизації

Розроблено керівний документ, що встановлює основні принципи з розрахувань вузла герметизації обсадних колон та насосно-компресорних труб для підвищення їх герметичності за умов буріння глибоких свердловин, яким притаманні високі термобаричні показники.

Фізико-механічні властивості матеріалів, що можуть претендувати на функціональність елемента герметизації наведено в табл.5

**Таблиця 5 – Фізико-механічні властивості матеріалів для елемента герметизації**

Показники Матеріал	Густина $\rho$ (кг/м <sup>3</sup> )	Модуль Пружності (Юнга) $E$ (МПа)	Коефіці- ент тертя по сталі $f$	Коефіцієнт Темпера- турного розшир. $\beta$ (1/К)	Стійкість до агресивних середовищ	Оцінка ризиків гальвано- корозії з металом труб
Сталь групи Д	7850	200 000	0.18	$13 \cdot 10^{-6}$	D	сумісність
Сталь легована	7850	206 000	0,17	$15,1 \cdot 10^{-6}$	C	сумісність
Сталь Вуглевод- нева	7500	195 000 - 205 000	0,16	$11,1 \cdot 10^{-6}$	D	сумісність
Мідь	8940	82 000	0,27	$16,16 \cdot 10^{-6}$	B	не сумісність
Бронза	8900	103 000	0,18	$18,1 \cdot 10^{-6}$	B	не сумісність
Латунь	8440	980 000	0,35	$20,5 \cdot 10^{-6}$	B	не сумісність
Алюміній	2700	630 000	0,1	$23,1 \cdot 10^{-6}$	C	сумісність
Титан	4500	116 000	0,3	$7,7 \cdot 10^{-6}$	A	сумісність
Політетра- фторетилен	2200	47 000	0,04	$110 \cdot 10^{-6}$	A	сумісність
Поліетилен	1140	37 000	0,25	$230 \cdot 10^{-6}$	B	сумісність
Поліпро- пилен	920	44 000	0,5	$160 \cdot 10^{-6}$	B	сумісність

Для максимально ефективного функціонування РЗ з елементом герметизації у глибокій свердловині з високими термобаричними показниками його матеріал повинен відповідати таким вимогам:

- модуль пружності (Юнга) повинен бути меншим, ніж у матеріалі труб;
- коефіцієнт температурного об'ємного розширення повинен, навпаки, бути більшим, ніж у матеріалі труб;
- не утворювати гальванопару.

Матеріал елемента герметизації повинен бути стійким до дії агресивного середовища (стійкість: А-відмінна; В-хороша; С-добра; D-посередня; Е-слабка), яке є в свердловині та технологічно легким задля умов механічного оброблення. Остаточний вибір матеріалу елемента герметизації визначається умовами експлуатації з'єднання.

Для проектування удосконалених з'єднань задля герметизації обсадної чи насосно-компресорної колони труб у довільному інтервалі глибин, тисків та температур необхідно звести інформацію в таблицю.

Технологія виготовлення герметичності муфтових з'єднань із ПКМ обсадних та насосно-компресорних труб за допомогою наведених розрахунків та програмного моделювання є технологічно вигідною та ефективною для застосування у виробничих умовах нафтогазових підприємств України.

Ефективність застосування елемента герметизації з ПКМ для умов буріння й експлуатації у глибоких свердловинах досягають завдяки чинникам:

- технології та конструктивних особливостей елемента;
- підвищення ущільнення шляхом розширення пропонованого елемента від впливу високого внутрішньо-експлуатаційного тиску;
- підвищення ущільнення від впливу високих температур через більший коефіцієнт теплового розширення полімерного матеріалу, з якого виготовлено елемент герметизації, ніж коефіцієнт теплового розширення матеріалу самих різьбових з'єднань обсадних та насосно-компресорних труб;
- впирання кінців труб в елемент герметизації, що перешкоджає їх стиску та виходу зі зчеплення різьби за значних осьових навантажень.

Застосування елемента герметизації з ПКМ не перешкоджає:

- функціональному призначенню з'єднань обсадних колон та насосно-компресорних труб;
- роботі породоруйнівного інструменту та свердловинного обладнання;
- функціональному призначенню промивальної рідини.

Виготовлення й застосування елемента герметизації з ПКМ для різьбових з'єднань обсадних та насосно-компресорних труб повністю відповідає стандартам без змін стосовно норм та вимог.

**У шостому розділі** наведено результати промислових випробувань та впровадження розробленого на основі наукових досліджень техніко-технологічного комплексу та удосконаленої технології буріння глибоких похило скерованих ділянок стовбура свердловин.

Задля адаптації розроблених технічних засобів і технологій до особливостей буріння на нафтогазових родовищах промислове випробування проводили у піщано-аргілітових та піщано-глинистих породах України, зокрема на Чорноморському шельфі та Дніпрово-Донецькій западині.

Промислові випробування розроблених технічних засобів і технологій, оброблення результатів їхнього відпрацювання, задля вдосконалення проводив науково-інженерний супровід досвідчених фахівців ПрАТ «НДІКБ БІ» за рекомендаціями дисертантки.

Виготовляли конструкції гідроакустичних генераторів у технічних лабораторіях ПрАТ «НДІКБ БІ».

Впроваджували результати дисертаційної роботи дисертантка сумісно з науковим консультантом доктором технічних наук Кунцяком Я. В.

Промислові випробування пристроїв енергії гідроколивачів, розроблених за результатами аналітичних та експериментальних досліджень проводили під час буріння на свердловині 10 Ковильненська (АР Крим) 2013 р, №103 та



№130 Ігнатівського родовища (Полтавська обл.) 2018 р, №5 Ярмаківського родовища (Полтавська обл.) 2019 р.

Вперше випробовували розроблений та виготовлений за нашими рисунками та рекомендаціями генератор гідроколивань у листопаді 2013 р. у свердловині №10 Ковильненська (АР Крим) долотом Ø 215,9HE44D3MRS Varel в інтервалі 3877-3905 м. Навантаження по ГВ-6 становило 12 т. За умов буріння на станції контролю спостерігали навантаження на долото 9-16 т, незважаючи на те, що ГВ-6 показував стабільне навантаження – 12 т. Коливання тиску було в межах 80 - 95 атм. У протоколі зафіксовано, що через 3 години коливання навантаження й тиску зникли, й станція фіксувала уже стабільні показники навантаження в 12 т й тиску 80 атм.

Промивальну рідину подавав агрегат НБ-600. Діаметр бурильної труби, на з'єднанні якої встановили розроблений генератор гідроколивань ГГК-Т-11, становив 127 мм. Секундний об'ємний розхід рідини становив 20-21 л/сек, густина промивальної рідини становила 1,32 г/см<sup>3</sup>, швидкість витікання рідини крізь отвори (Ø 12,7; 14,3; 15,9 мм). Тиск на агрегаті становив 60-70 атм, тиск на вибої 514 атм.

Після підняття на поверхню відпрацьованого генератора ГГК-Т-11 провели фотографування (рис. 16) та візуальний контроль.



Рисунок 16 – Поперечний розріз генератора гідроколивань після відпрацювання на свердловині №10 Ковильненська (АР Крим-2013)

Встановлено, що краї камери закручування потоку мали наслідки гідро абразивного зношення, оскільки промивальна рідина БЮКАР, яку застосовували в умовах буріння, у своєму складі містила дрібні абразивні частинки.

Із наведеного вище зроблено важливий висновки про те, що конструкції розроблених генераторів дипольно-прецесійного типу здатні створювати гідро коливання, про що засвідчують коливання навантаження та тиску. Наслідки гідро абразивного руйнування в камері доводять

необхідність армування її поверхні.

Враховавши цей досвід, ми виготовили нову партію генераторів та зміцнили їхню поверхню, зокрема ГГІ-2-10 – 2 шт – провели індукційне наплавлення шихтою по ТУ У25.9-30023472-001:2012, ГГІ-ЦШ-10 – 2 шт провели газополум'яне напилення з оплавленням поверхні, ГГК-Т-11 – 2 шт – провели дугове наплавлення твердим сплавом ВК-15. Зміцнення проводили спеціалісти ДП «Алкон-Діамант» НТАК АЛКОН НАН України в період 20.03.2017 – 20.04.2017 р.

Наступне промислове випробування зміцнених генераторів гідроколивань провели в межах 14 – 27.11.2018 р. на свердловинах №130 та №103 Ігнатівського

родовища. КНБК містило зміцнені генератори ГПІ-2-10, які встановили за розрахунковою схемою.

Для порівняння обрали вертикальну свердловину №130 Ігнатівського родовища в інтервалі 2601-2812 м та свердловину №103 Ігнатівського родовища, що відновлювали похило-скерованим стовбуром свердловини в інтервалі 2600-2808 м, відхід від гирла свердловини склав 587 м, зенітний кут становив 38÷39 град.

У КНБК встановили генератори ГПІ-2-10 діаметром 139 мм, де загальне компонування було таким: дол. Ø 152,4 MDSi613LWBPX + КЛС Ø 151 + ВГД Ø124 (1,22°) + ТС Ø 120 + СКЛС (генератор ГПІ-2-10) Ø 139 + ОБТС Ø 120,8 (36 м) + СКЛС (генератор ГПІ-2-10) Ø 139 + ОБТС Ø 120,8 (18 м) + СКЛС (генератор ГПІ-2-10) Ø 139 + НВБТ Ø 89 (18 м) + ЯС Ø 120 + НВБТ Ø 89 (36 м) + СБТ Ø 102,6 (432 м) + СКЛС (генератор ГПІ-2-10) Ø 139 + СБТ.

Інтервал буріння був 2600-2808 м, де літологія порід представлена вапняками та пісковиками. Показники поглиблення були такими: проходження на долото – 208 м, час механічного буріння цього інтервалу – 85 годин, механічна швидкість буріння – 2,44 м/год. Контроль режимів буріння засвідчив: навантаження – 50-60 кН, частота – 100 об/хв., об'ємний розхід промивальної рідини – 0,016 м<sup>3</sup>/с, тиск – 13,5 МПа. Спостереження за параметрами промивальної рідини показали, що за умов густини 1,24-1,27 г/см<sup>3</sup> тиксотропність була 64 сек, а фільтрація – 3,8 см<sup>3</sup>/30 хв.

Порівнювали вертикальну (азимут 5°) свердловину №130 цього ж Ігнатівського родовища в аналогічному інтервалі 2601-2812 м без застосування генераторів гідроколивачів, де літологія представлена тими самими породами: вапняками та пісковиками. У цій свердловині показники заглиблення були такими: проходження на долото – 211 м, час буріння цього інтервалу – 103 год, швидкість буріння – 2,04 м/год. Контроль режимів буріння засвідчив: навантаження – 60-80 кН, частота – 90 об/хв., об'ємний розхід промивальної рідини – 0,014 м<sup>3</sup>/с, тиск – 10,4 МПа. Спостереження за параметрами промивальної рідини показали, що за умов густини 1,12 г/см<sup>3</sup> тиксотропність була 34 сек, а фільтрація – 4 см<sup>3</sup>/30 хв.

КНБК на свердловині №130: дол. Ø 152,4 мм XR-20TY + наддолотний перехідник + ГВД Ø 127 + роликівий розширювач Ø 152,4 мм + ОБТ Ø 120,7 (99 м) + ЯС Ø 120 + ОБТ 120,7 (27 м) + НВБТ Ø 89 (56 м) + СБТ.

Наведені результати свідчать, що за умов буріння свердловини №103 з використанням у КНБК генераторів гідроколивачів середня механічна швидкість буріння була на 19,6% вищою, ніж за умов буріння вертикального стовбура свердловини №130 на тому самому Ігнатівському родовищі. За умов буріння похило-скерованого стовбура свердловини №103 були відсутні затяжки та посадки під час опускально-підіймальних операцій.

Наступне промислове випробування запропонованої КНБК із застосуванням у ній зміцнених генераторів гідроколивачів серії ГГК-Т-11, проводили на свердловині №5 Ярмаківського родовища в період 07 – 09.01.2019 р.

Роботи проводили на свердловині №5 Ярмаківського родовища за умов буріння пілотно похило скерованого стовбура звичною КНБК та горизонтального стовбура експериментальною КНБК. Відхід від гирла свердловини – 388 м. Експериментальна конструкція містила генератори Ø 139 мм, що встановлювали за запропонованою

схемою розрахунку. Інтервал буріння складав 2589–2620 м за зенітного кута 88–90 град.

За результатами промислових випробувань зроблено висновок, що під час використання експериментального компоунування середня механічна швидкість буріння була на 33% вищою, ніж за умов буріння пілотного стовбура, також були відсутні затяжки під час відриву від вибою та підйому бурильного інструменту.

Дослідження довели, що розміщення розроблених конструкцій генераторів у КНБК та на певних ділянках бурильної колони суттєво підвищують механічну швидкість буріння (~ до 35%) Такий результат пояснюємо ефективним доведенням динамічного осьового навантаження у вибої свердловини, зменшенням сил тертя бурильної колони зі стінки свердловини, що, як наслідок, знижує ймовірність небезпеки прихоплень бурильної колони в похило-скерованій та горизонтальній ділянках глибоких свердловини.

Задля перевірки результатів досліджень із застосування полімерного напилення на елементи бурильної колони провели промислові дослідження. Обрали три типи покриття, зокрема: №1-й – покриття компаунд ГЕН-150, №2-й – покриття пентопластом із наповнювачем оксиду хрому (~2%  $Cr_2O_3$ ) на спецоснові й №3-й – покриття з ПКМ на основі Ф4 зі стабілізатором і також на спецоснові.

Покрили три перевідники діаметра 203 мм з довжиною робочої поверхні 420 мм кожен. На зовнішній поверхні перевідників по колу зробили 4 паски ширини 5 мм і товщини 0,5 мм на віддалі 140 мм.

Для необхідної адгезії покриття до поверхні металу під час дослідження обрали рецептуру спеціальної основи на базі полізоціонату. Основу готували як розчин в ацетоні у співвідношенні 1:10. Нанесення основи проводили розпиленням, щоб отримати суцільний шар (~ $30 \cdot 10^{-6}$  м) за кімнатної температури. На основу методом електростатичного напилення наносили один з обраних порошків, технологічна схема якого згадана вище. Наносили порошок з подальшим його оплавленням тричі на одному зразку для досягнення необхідної товщини покриття в 0,5 мм. По закінченню нанесення кожного шару, елемент з покриттям остигав за кімнатної температури, що призводило до затвердіння покриття. Температура оплавлення становила  $230 \pm 5^\circ C$ , а час –  $25 \pm 5$  хв. Гірничо-геологічні умови випробувань наведено в таблиці 6.

**Таблиця 6 – Умови роботи перевідників із полімерним покриттям**

№ зразка	Інтервал роботи (м)	Проходка на долото (м)	Час бур. (год)	Механічна швидкість (м/год)	Спосіб буріння	Зенітний кут (град)	Азимут (град)	Частота обертання колони (об/хв)
1	1412-1620	78	23	3,18	турбінний	1,5-13,25	74-118	60-90
2								
3								

Усі три перевідники випробовували одночасно в одній конструкції бурильної колони.

За технологією покриття на рис. 17 зліва – зразок із покриттям зі стабілізатором на основі Ф4; центральний зразок – із покриттям із пентапласту з наповнювачем оксиду хрому (~2%  $Cr_2O_3$ ); справа зразок – із покриттям із компаунду ГЕН-150.

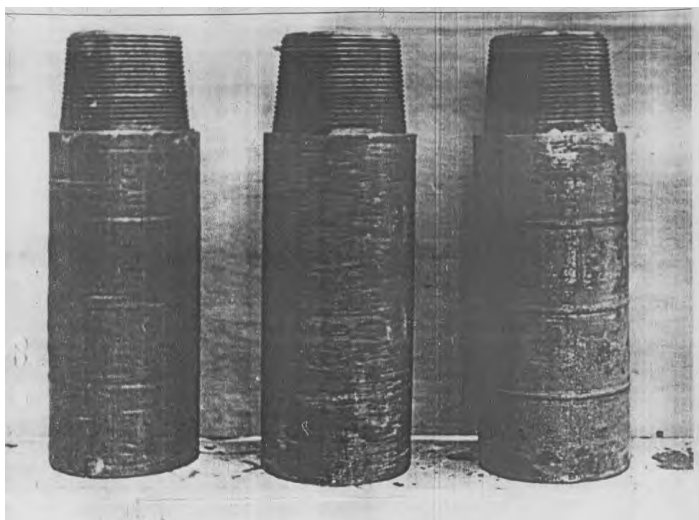


Рисунок 17 – Зразки з полімерним покриттям перевідників після відпрацювань у свердловині

Після підйому колони результати були такими: покриття з ГЕН-150 було спрацьоване повністю, пентапласт із наповнювачем оксиду хрому спрацьоване частково (рис.17). ПКМ на основі Ф4 зі стабілізатором майже не зношене, виявлено тільки декілька вертикальних і горизонтальних подряпин.

У такий спосіб, найбільш зносостійким є покриття з ПКМ на основі Ф4. Враховуючи, що це покриття формується методом електростатичного напилення з подальшим оплавленням, а також те,

що цей спосіб є достатньо перспективним, його технологія не залежить від конфігурації поверхні, яку покривають, є доцільним створення на промислі цеху з отримання полімерного покриття поверхні елементів бурильної колони, що буде вигідним як з практичної так і з економічної точки зору.

Результати успішного промислового випробування, розроблених технічних засобів, пристроїв та технологій підтвердили їх високу надійність та ефективність, а, разом стали підставою для розроблення інструктивних документів, застосування яких на нафтопромислах України забезпечить підвищення ефективності буріння глибоких похило-скерованих ділянок стовбура свердловин.

## ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі, яка є завершеним науковим дослідженням, розв'язано науково-технічну проблему створення та розвитку наукових основ підвищення ефективності буріння глибоких похило-скерованих ділянок стовбура свердловин із застосуванням методів математичного моделювання, експериментальних та промислових досліджень, результати якої спрямовані на вирішення важливої наукової та народногосподарської проблеми, що полягає у створенні та вдосконаленні нових вітчизняних технологій, компоновок низу бурильної колони та технічних пристроїв і засобів, застосування яких забезпечує: запобігання явищ прихоплень бурильної колони; покращення очищення вибою свердловини; підвищення ефективності доведення динамічного осьового навантаження породоруйнівним інструментом до вибою свердловини; підвищення швидкості буріння у гірничо-геологічних умовах нафтогазових родовищ України. На основі теоретичних та експериментальних досліджень отримано наукове обґрунтування і

подальший розвиток технології вдосконалення герметичності різьбових з'єднань обсадних і насосно-компресорних труб для експлуатації у високотемпературних глибоких свердловинах.

Впровадження розроблених технічних засобів і технологій для буріння глибоких похило-скерованих ділянок нафтогазових свердловин забезпечує успішне будівництво свердловин в гірничо-геологічних умовах родовищ України, а також відновлення ліквідованих та малодебітних свердловин.

Зокрема, висновки, що узагальнюють результати наукових досліджень є такі:

1. На основі методу математичного моделювання, що базувався на математичних розрахунках, в основі яких є співвідношення пружності та рівняння руху криволінійного елемента, розроблено нову методологію конструювання та відповідну конструкцію серпоподібної форми концентратора для генератора енергії спрямованої дії з метою зміцнення поверхні різьб ЗРЗ.

2. Встановлено, що зміцнюється поверхня без порушення величини западини різьби, що призводить до підвищення границі витривалості конічних різьб ЗРЗ на 45–50%, а відповідно, і до підвищення надійності та довговічності бурильної колони в процесі буріння глибоких нафтових і газових свердловин.

3. Вперше на основі досліджень впливу гідродинамічних коливань на динаміку промивних рідин в затрубному просторі та на динаміку БК розроблено методологію конструювання та серію генераторів гідроколивачів для умов роботи в глибоких свердловинах, механізм дії яких базується на явищі прецесії дипольного гідроосцилятора.

4. Вперше розроблено математичну модель з розрахування впливу параметрів генератора гідроколивачів на його продуктивність.

5. Вперше запропоновано методологію для визначення місць додаткового розміщення генераторів гідроколивачів в КНБК з метою запобігання явищ прихоплення та зменшення сил тертя в місцях контакту колони бурильних труб зі стінкою свердловини в глибоких похило-скерованих ділянках стовбура свердловин, що підтверджено промисловими випробуваннями на родовищах України.

6. Встановлено, що застосування генераторів такої дії в конструкції породоруйнівного інструменту та в КНБК для умов буріння в глибоких похило-скерованих свердловинах підвищує ефективність доведення осьового навантаження у вибій свердловини, підвищуючи швидкість буріння на 20÷35%.

7. Здійснено структурну оптимізацію ПКМ на основі Ф4 з урахуванням консолідації, адгезії та зношуваності для покриття поверхні елементів бурильної колони задля запобігання явищ прихоплення. Розроблено методику, технологію та устаткування для нанесення покриття.

8. Експериментально доведено, що застосування ПКМ на основі Ф4 для покриття поверхні елементів бурильної колони в найбільш прихопленебезпечних місцях запобігає явищам прихоплення БК та КНБК в глибоких похило-скерованих свердловинах.

9. Удосконалено метод пошуку підвищення герметичності ЗРЗ обсадних та насосно-компресорних труб для глибоких свердловин з врахуванням високих термобаричних показників та запобігання утворенню гальванопари.

10. Встановлено, що найбільш оптимальною модифікацією елементу герметизації є конструкція з ПКМ на основі Ф4 з додаванням у матрицю пилу міді, оскільки різниця коефіцієнтів об'ємного температурного розширення матеріалу елементу герметизації та муфти і ніпеля різьбового з'єднання обсадних і насосно-компресорних труб підвищує контактний тиск в ущільненні під час підвищення термобаричних показників у глибокій свердловині, а відповідно – і гарантовану високу герметичність ЗРЗ насосно-компресорних труб та обсадних колон.

11. Розроблено, затверджено та передано до застосування на промислах нафтогазових родовищ України керівні документи та рекомендації щодо застосування розроблених в дисертаційній роботі засобів, пристроїв і технологій, впровадження яких підвищить ефективність буріння глибоких похило-скерованих свердловин, знизить їх комерційну вартість, підвищить енергетичну незалежність України.

### СПИСОК НАУКОВИХ ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Chernova M. Ye. Kuntsyak Y. V. Study of the stress strain of rock massif in the crooked wellbore AGH DRILLING OIL GAS, 2014. Vol. 31. No. 4. P. 507-512. DOI: <http://dx.doi.org/10.7494/drill.2014.31.4.507>.

2. Chernova M. Ye. Influence of low frequency vibrations on drill string dynamics AGH DRILLING OIL GAS, 2014. Vol. 31. No. 3. P.423-430. DOI: <http://dx.doi.org/10.7494/drill.2014.31.3.423>.

3. Чернова М. Наукові тенденції буріння глибоких нафтогазових свердловин. International Academy Journal Web of Scholar, 2019. 1(31). Vol. 1. P. 18-39. DOI: [https://dx.doi.org/10.31435/rsglobal\\_wos/31012019/6308](https://dx.doi.org/10.31435/rsglobal_wos/31012019/6308).

4. Чернова М. Є. Можливості зменшення сил тертя та прихоплень бурильної колони на похило-скерованій та горизонтальній ділянках стовбура глибоких свердловин. SWorld Seientific papers, 2017. Vol. 2, Iss. 46, P. 71-78. DOI: <https://dx.doi.org/10.21893/2410-6720.2017-46.1.-77>.

5. Напряженное состояние сварных соединений УБТ с приварными резьбовыми концами / Чернова М. Е., и др. *КазУТУ хабаршииси*: зб. наук. праць Казахського національного технічного університету ім. К. І. Сатпаєва. Алмати, республіка Казахстан, 2015. №6, С. 315-320.

6. Чернов Б. О., Сімків (Чернова) М. Є., Чернов В. Б. Методи підвищення довговічності елементів бурильної колони. *Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. Серія «Буріння нафтових і газових свердловин»*, 2008. №4(29). С. 98-103.

7. Яворський В. М. Чернова М. Є., Чернов Б. О. Пружно-деформований стан муфтового з'єднання обсадних труб з герметизуючим елементом у високотемпературних свердловинах. *Всеукраїнський науково-технічний журнал «Нафтогазова енергетика»*. 2009. №1 (10). С. 41-44.

8. Чернова М. Є., Чернов Б. О. Підвищення експлуатаційних характеристик бурильної колони за рахунок використання в КНБК ОБТ змінної жорсткості. *Науковий вісник ІФНТУНГ*. 2009. №1 (19). С. 82-86.

9. Чернова М. Є., Кунцяк Я. В., Кунцяк Р. Я. Удосконалення технології буріння похило-скерованих і горизонтальних свердловин у нестійких породах. *Науковий вісник ІФНТУНГ*. 2010р. № 3(25). С. 15-17.

10. Підвищення експлуатаційних характеристик обсадних колон шляхом удосконалення конструкцій різьбових з'єднань / М. Є. Чернова та ін. *НТЖ «Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ»*. 2011. № 1(38), С. 91-96.

11. Підвищення герметичності обсадних колон за рахунок удосконалення конструкцій різьбових з'єднань / М. Є. Чернова та ін. «*Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения*» НАН України Інст.ім. В.Н.Бакуля: зб. наук. праць. 2011. Вип. 14. С. 182-186.

12. Дослідження геологічних і експлуатаційних характеристик Битків-Бабчинського родовища та застосування сучасних методів інтенсифікації / Чернова М. Є. та ін. *НТЖ «Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ»*. 2011. № 3(40). С. 85-89.

13. Чернова М. Є., Кунцяк Я. В. Дослідження впливу зенітного кута на стійкість стінок стовбурів, що знаходяться в пружно-деформованому стані в процесі буріння горизонтальних свердловин. *НТЖ «Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ»*. 2011. № 3(40). С. 37-41.

14. Чернова М. Є. Прогнозування довговічності елементів бурильної колони з врахуванням законів нелінійної деформації. *НТЖ «Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ»*. 2012. №1 (42). С. 124-134.

15. Чернова М. Є. Генерація віброколивань у процесі буріння свердловин. *НТЖ «Науковий вісник ІФНТУНГ»*. 2012. №3 (33). С. 112-121.

16. Чернова М. Є., Чернов Б. О., Мовчан В. М. Підвищення герметичності обсадних колон. «*Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения*» НАН України Інст.ім. В.Н.Бакуля: зб. наук. праць. 2012. Вип. 15. С. 215-220.

17. Чернова М. Є. Полімерно-композиційні матеріали для елементів бурильної колони. *Всеукраїнський цоквартальний НТЖ «Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ»*. 2013. №1 (46). С. 153-161.

18. Чернова М. Є. Динаміка гідроакустичних коливань у затопленій струміні затрубного простору бурильної колони. *Всеукраїнський науково-технічний журнал «Науковий вісник ІФНТУНГ»*. 2013. №1 (34). С. 82-88.

19. Чернова М. Є., Бігун М. О. Вплив низькочастотних коливань на динаміку бурильної колони. «*Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения*» НАН України Інст.ім. В.Н.Бакуля: зб. наук. праць. 2013. Вип. 16. С. 197-201.

20. Чернова М. Є., Кунцяк Я. В. Підвищення працездатності обважнених бурильних труб на основі розробки вітчизняних технічних засобів. «*Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения*» НАН України Інст.ім. В.Н.Бакуля: зб. наук. праць. 2014. Вип. 17. С. 170-173.

21. Кунцяк Я. В., Чернова М. Є., Бігун М. Б. Дослідження механізму коливних процесів у генераторі гідродинамічних імпульсів спрямованої дії.

*«Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения» НАН України Інст.ім. В.Н.Бакуля: зб. наук. праць. 2014. Вип. 17. С. 160-166.*

22. Чернова М. Є. Дослідження впливу полімерно-композиційних матеріалів на ефективність буріння похило-скерованих та горизонтальних свердловин. *«Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения» НАН України Інст.ім. В.Н.Бакуля: зб. наук. праць. 2014. Вип. 17. С. 151-159.*

23. Чернова М. Є. Дослідження гідродинамічних циркуляційних процесів промивальної рідини під час буріння похило-скерованих і горизонтальних свердловин. *НТЖ «Науковий вісник ІФНТУНГ». 2014. №1 (36). С. 48-52.*

24. Управління динамікою роботи компоновки низу бурильної колони. /М.Є. Чернова та ін. *«Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения» НАН України Інст.ім. В.Н.Бакуля: зб. наук. праць. 2015. Вип. 18. С. 58-63.*

25. Чернова М. Є., Кунцяк Я. В. Забезпечення герметичності обсадних колон за рахунок конструктивних особливостей різьбових з'єднань. *«Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения» НАН України Інст.ім. В.Н.Бакуля: зб. наук. праць. 2016. Вип. 19. С. 86-92.*

26. Чернова М. Є., Кунцяк Я. В. Можливості зменшення сил тертя та прихоплень бурильної колони на похило-скерованих та горизонтальних ділянках стовбура глибоких свердловин. *«Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения» НАН України Інст.ім. В.Н.Бакуля: зб. наук. праць. 2017. Вип. 20. С. 63-70.*

27. Чернова М. Є. Застосування полімерно-композиційних матеріалів для елементів бурильної колони. *«Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения» НАН України Інст.ім. В.Н.Бакуля: зб. наук. праць. 2018. Вип. 21. С. 94-102.*

28. Chernova M. Ye., Kuntsyak Ya. V. Study of the stress strain of rock massif in the crooked wellbore. *Международное научное издание «Сборник научных трудов SWorld». Технические науки. Иваново: МАРКОВА АД, 2014. Вып. 3 (36), Т.3. С. 32-37.*

29. Чернова М. Е. Исследование напряженного состояния сварных соединений утяжеленных труб с приварными резьбовыми концами. *Международное научное издание «Сборник научных трудов SWorld». Технические науки. Иваново: МАРКОВА АД, 2014. Вип. 4(37), т. 9, С. 23-31.*

30. Механізм коливних процесів у генераторі гідродинамічних імпульсів спрямованої дії / М. Є. Чернова та ін. *Международное периодическое научное издание «Мир науки и инноваций» Иваново: Научный мир, 2015. Вып. 1, Т. 4. С. 22-27.*



31. Чернова М. Є. Фізична суть коливних процесів у бурінні нафтогазових свердловин. *Международное периодическое научное издание «Научный взгляд в будущее»*. Одесса: Куприенко СВ, 2016. Вып. 2(2), Том 5. С. 53-61.

32. Деякі методи теоретичних та експериментальних досліджень в бурінні: монографія /Чернова М. Є. та ін. *«Научные ответы на вызов современности: техника и технологии» SWorld*. Одесса: КУПРИЕНКО СВ, 2016. Кн. 1. 176 с.

33. Чернова М. Є. Можливості зменшення сил тертя та прихоплень бурильної колони на похило-скерованій та горизонтальній ділянках стовбура свердловин. *Международное научное издание «Сборник научных трудов SWorld»*. Иваново, (РФ): Научный мир, 2017. Вып. 46, Том 2, С. 71-78.

34. Відновлення дебіту нафтових і газових свердловин на основі використання енергії спрямованої дії / М. Є. Чернова та ін. *«Наука і освіта»*: зб. наук. праць за матеріалами Міжнар. наук. конф. м. Коломбо (Шрі-Ланка), 2010. С. 50-53.

35. Чернов Б. О., Чернова М. Є., Коваль В. І. Методика розрахунку матеріального балансу вуглеводнів методом математичного моделювання фазової рівноваги. *«Наука і освіта»*: зб. наук. праць за матеріалами Міжнар. наук. конф. м. Коломбо (Шрі-Ланка), 2010. С. 46-50.

36. Дослідження впливу конструктивних і технологічних чинників на динамічні характеристики пристроїв хвильової дії / М. Є. Чернова та ін. *«Сучасні досягнення в науці та освіті»*: зб. наук. праць за матеріалами IV-ї міжнародної наукової конференції м. Будва (Чорногорія), 2010. С. 255-256.

37. Чернова М. Є., Кунцяк Я. В., Кунцяк Р. Я. Буріння похило-скерованих і горизонтальних свердловин з використанням сучасних технологій і засобів. *«Сучасні досягнення в науці та освіті»*: зб. наук. праць за матеріалами IV-ї міжнародної наукової конференції м. Будва (Чорногорія), 2010. С. 250-252.

38. Чернова М. Є. Шляхи очищення стовбура та привибійної зони свердловин. *«Інноваційні технології буріння свердловин, видобування нафти і газу та підготовки фахівців нафтогазової галузі»*. зб. наук. праць за матеріалами МНТК ІФНТУНГ 2012. С. 52-57.

39. Чернова М. Є. Методи підвищення герметичності обсадних колон похило-скерованих і горизонтальних свердловин. *«Нафтогазова освіта та наука: стан та перспективи» ІФНТУНГ*: зб. наук. праць за матеріалами Міжнародної науково-технічної конференції присвяченої 70 річчю газонафтопромислового факультету 10-12 грудня 2014 р. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ 2014. С. 207-210.

40. Чернова М. Є. Екологічні матеріали для покриття елементів бурильної колони. *«Екогеофорум-2017. Актуальні проблеми та інновації»*: зб. наук. праць за матеріалами міжнародної науково-практичної конференції до 50-річчя ІФНТУНГ. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ 2017. С. 121-123.

41. Різьбове з'єднання обсадних та насосно-компресорних труб: пат. 57111 Україна. №u201009211; заявл. 22.07.2010; опубл. 10.02.2011. Бюл. № 3.

42. Генератор гідравлічних імпульсів: пат. 58651 Україна. №u201009206; заявл. 22.07.2010; опубл. 26.04.2011. Бюл. № 8.

43. Генератор гідроакустичних імпульсів: пат. 63187 Україна. № 201105983; заявл. 2011.05.13; опубл. 26.09.2011. Бюл. № 18.
44. Свердло: пат. 72459 Україна, №u201114267; заявл. 02.12.2011; опубл. 27.08.2012. Бюл. № 16.
45. Колона термоізолюваних труб: пат. 74651 Україна. №u201203430; заявл. 22.03.2012; опубл. 12.11.2012. Бюл. № 21.
46. Обважнена бурильна труба: пат. 76003 Україна. №u201205472; заявл. 05.03.2012; опубл. 25.12.2012. Бюл. № 24.
47. Пристрій для контролю прямолінійності отворів: пат. 77534 Україна. №201205465; заявл. 05.03.2012; опубл. 25.02.2013. Бюл. № 4.
48. Компоновка низу бурильної колони: пат. 115886 Україна. №u201612598 заявл. 09.12.2016; опубл. 25.04.2017. Бюл. № 8.
49. Долото з генератором гідроколивань: пат. 117435 Україна. №u201700481; заявл. 18.01.2017; опубл. 26.06.2017. Бюл. № 12.
50. Полімерне покриття елементів бурильної колони: пат. 124700 Україна. №2017008773; заявл. 31.08.2017; опубл. 25.04.2018. Бюл. № 8.

## АНОТАЦІЯ

**Чернова М.Є.** Розвиток наукових основ підвищення ефективності буріння глибоких похило-скерованих свердловин (для умов нафтогазових родовищ України). – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.15.10 – Буріння свердловин. – Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ, 2019 р.

Дисертація присвячена розвитку наукових основ та розробці комплексу високоефективних технологій та пристроїв для підвищення швидкості та ефективності буріння глибоких похило-скерованих ділянок стовбура свердловини в складних геологічних умовах покладів гірських порід, притаманних родовищам України.

За результатами аналітичних, експериментальних та промислових досліджень встановлено вплив коливних явищ на ефективність буріння глибоких похило-скерованих свердловин. Обґрунтовано та розроблено методологію конструювань та серію конструкцій генераторів гідроколивань дипольно-прецесійного типу залежно від необхідних частотно-амплітудних характеристик коливних процесів для буріння глибоких похило-скерованих свердловин, їх промислове впровадження засвідчило підвищення механічної швидкості буріння до 35%. Розроблено методику розрахунку додаткового розміщення генераторів гідроколивань по довжині бурильної колони для запобігання явищ прихоплення.

Розроблено конструкцію породоруйнівного інструменту з генератором гідроколивань, що забезпечує ефективніше доведення осьового навантаження у вибій свердловини, а, разом, підвищує швидкість буріння.

Встановлено вплив полімерного покриття зовнішньої поверхні елементів бурильної колони на зменшення сил тертя між стінками стовбура свердловини та бурильною колоною, розроблено методику і технологію її полімерного покриття.

Удосконалено теоретичні основи використання в КНБК ОБТ змінного моменту інерції для плавного переходу в жорсткості між елементами конструкції.

Обґрунтовано серпоподібна геометрія концентратора генератора енергії спрямованої дії для зміцнення поверхні різьб ЗРЗ методом ультразвукової обробки.

Розроблено високогерметичне муфтове з'єднання для обсадних і насосно-компресорних труб за умов експлуатації в глибоких свердловинах за високих тисків та температур.

Проведені стендові і промислові дослідження та впровадження розроблених технологій, пристроїв та методик.

Ключові слова: генератор коливань, бурильна колона, полімерне покриття, свердловина, тертя, компонування низу бурильної колони.

## ABSTRACT

**Chernova M. Je.** Development of scientific foundations of increasing the efficiency of drilling of deep inclined-directional wells (for the conditions of oil and gas fields of Ukraine). - On the rights of the manuscript.

Dissertation for obtaining a scientific degree of Doctor of Technical Sciences in specialty 05.15.10 - Drilling wells. - Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, 2019.

The dissertation is devoted to the development of scientific principles and the development of a complex of high - efficiency technologies and devices for increasing the speed and efficiency of drilling deep inclined-directional sections of the wellbore in the complex geological conditions of reservoir rocks characteristic for oil and gas fields in Ukraine.

According to the results of analytical, experimental and industrial studies, the influence of oscillation phenomena on the efficiency of drilling of inclined-directional sections of the wellbore has been established. The methodology of constructions and series of constructions of dipole precession type oscillation generators depending on the required frequency-amplitude characteristics of oscillatory processes for drilling deep inclined-directional wells is substantiated and developed, their industrial implementation has shown the increase of mechanical speed by 35%. A method for calculating the additional placement of the oscillation generators along the length of the drill string was developed to prevent trapping phenomena.

The design of the rock-destructive tool with the vibration generator is developed, which provides more efficient bringing of axial load into the well bottom and, at the same time, increases the drilling speed.

The influence of the polymer coating of the outer surface of the drill string elements on the reduction of friction forces between the walls of the wellbore and the drill string was established, and the method and technology of its polymer coating was developed.

The theoretical basis is developed of the variable moment of inertia in the layout of the lower of the drill string for the smooth transition in stiffness between structural elements.

The sickle-shaped geometry of the concentrator of the energy generator of directional action for strengthening of a thread surface of locking threaded connections by the method of ultrasonic treatment is grounded.

High-tight coupling connection for casing and pump-compression tubing for deep wells at high pressures and temperatures has been developed.

Bench and industrial research and implementation of developed technologies, devices and techniques were carried out.

Keywords: oscillator, drill string, polymer coating, well, friction, layout of the bottom of the drill string.

## **АННОТАЦИЯ**

Чернова М.Е. Развитие научных основ повышения эффективности бурения глубоких наклонно-направленных скважин (для условий нефтегазовых месторождений Украины). - На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.15.10 - Бурение скважин. - Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, г. Ивано-Франковск, 2019.

В диссертационной работе, являющейся законченным научным исследованием, решена научно-техническая проблема создания и развития научных основ повышения эффективности бурения глубоких наклонно-направленных скважин. Используются методы математического моделирования, проведены экспериментальные и промышленные исследования. Их результаты направлены на решение важной научной и народнохозяйственной проблемы, заключающейся в создании и совершенствовании новых отечественных технологий, технических приспособлений и средств, в бурении. Применение полученных результатов обеспечит: предотвращение явлений прихвата бурильной колонны; улучшение очистки забоя скважины; повышение эффективности доведения осевой нагрузки в забой скважины; повышение скорости бурения в горно-геологических условиях нефтегазовых месторождений Украины. Теоретические и экспериментальные исследования обосновали развитие технологии совершенствования герметичности резьбовых соединений обсадных и насосно-компрессорных труб для эксплуатации в высокотемпературных глубоких скважинах.

Внедрение разработанных технических средств и технологий для бурения глубоких наклонно-направленных участков нефтегазовых скважин обеспечивает успешное строительство скважин в горно-геологических условиях месторождений Украины, а также восстановление ликвидированных и малодобитных скважин.

В частности, выводы и общие результаты научных исследований состоят в том, что:

1. На основании метода математического моделирования и математических расчетов, в основе которых лежит соотношение упругости и уравнение движения криволинейного элемента, разработана новая методология конструирования, а соответственно, и конструкция концентратора серповидной формы для генератора энергии направленного действия с целью упрочнения впадин резьб замковых резьбовых соединений (ЗРС).

2. Установлено, что упрочнение поверхности происходит без нарушения величины впадины резьбы, что повышает предел выносливости конических резьб ЗРС на 45-50%, а, соответственно, ведет к повышению надежности и долговечности бурильной колонны при бурении глубоких нефтегазовых скважин.

3. Впервые, основываясь на исследованиях влияния гидродинамических колебаний на динамику промывочных жидкостей в затрубном пространстве и динамику БК, разработана методология конструирования и серия генераторов гидродинамических колебаний для условий эксплуатации в глубоких скважинах, работа которых основана на явлении прецессии дипольного гидроосцилятора.

4. Впервые разработана математическая модель для расчета влияния параметров генератора гидродинамических колебаний на его энергетические свойства.

5. Впервые предложена методология по определению мест дополнительного размещения разработанных генераторов в компоновке низа бурильной колонны с целью предотвращения прихвата и уменьшения сил трения в местах контакта БК со стенкой скважины в наклонно-направленных участках глубоких скважин, что подтверждено промышленными испытаниями на месторождениях Украины.

6. Установлено, что применение генераторов такого действия в конструкции породоразрушающего инструмента и в КНБК для условий бурения в глубоких наклонно-направленных скважинах повышает эффективность динамической осевой нагрузки на забой скважины, повышая при этом скорость бурения на 20 ÷ 35%.

7. Осуществлена структурная оптимизация ПКМ на базе Ф4 с учетом консолидации, адгезии и износа для покрытия поверхности элементов бурильной колонны с целью предотвращения прихвата. Разработана методика и технология нанесения покрытия.

8. Экспериментально доказано, что применение ПКМ на базе Ф4 для покрытия поверхности элементов бурильной колонны в наиболее прихватоопасных местах, предотвращает прихват БК и КНБК в глубоких наклонно-направленных скважинах.

9. Усовершенствован метод поиска повышения герметичности резьбовых соединений обсадных и насосно-компрессорных труб для условий эксплуатации в глубоких скважинах с высоких термобарических показателей, и с учетом не образования гальванопары.

10. Установлено, что наиболее оптимальной модификацией конструкции герметизирующего элемента есть конструкция из ПКМ на базе Ф4 с добавлением в матрицу пыли меди, поскольку разница коэффициентов объемного температурного расширения материала герметизирующего элемента, муфты и ниппеля резьбового соединения обсадных и насосно-компрессорных труб обеспечивает повышение контактного давления в уплотнении, в условиях повышенных термобарических показателей в глубокой скважине, гарантируя высокую герметичность ЗРС насосно-компрессорных труб и обсадных колонн.

11. Разработаны, утверждены и переданы к применению на промыслах нефтегазовых месторождений Украины руководящие документы и рекомендации по применению разработанных в диссертационной работе средств, устройств и технологий, внедрение которых обеспечит повышение эффективности бурения глубоких наклонно-направленных скважин, снизит их коммерческую стоимость, повысит энергетическую независимость Украины.

Ключевые слова: генератор колебаний, бурильная колонна, полимерное покрытие, скважина, трение, компоновка низа бурильной колонны.