

Артем ПАВЛИЧЕНКО

Євгеній КОРОВЯКА

Андрій ІГНАТОВ



ТЕХНОЛОГІЧНІ ТА ЕКОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ОКРЕМИХ ОПЕРАЦІЙ ПРОЦЕСУ СПОРУДЖЕННЯ СВЕРДЛОВИН



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний технічний університет
«ДНІПРОВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»



А.В. Павличенко, Є.А. Коровяка, А.О. Ігнатов

ТЕХНОЛОГІЧНІ ТА ЕКОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ОКРЕМИХ ОПЕРАЦІЙ
ПРОЦЕСУ СПОРУДЖЕННЯ СВЕРДЛОВИН

Монографія

Дніпро
Журфонд
2024

УДК 622.244.4

П12

Затверджено до видання вченою радою НТУ «Дніпровська політехніка», як монографія для фахівців і студентів спеціальностей 183 «Технології захисту навколишнього середовища», 184 «Гірництво» та 185 «Нафтогазова інженерія та технології» (протокол № 12 від 04.11.2024).

Рецензенти:

Я.М. Фем'як – доктор технічних наук, професор, професор кафедри буріння свердловин Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу;

Ю.Л. Винников – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри буріння та геології Навчально-наукового інституту нафти і газу Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»;

О.О. Медведєва – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, т.в.о. завідувача відділу екології освоєння природних ресурсів Інституту геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова Національної академії наук України.

Павличенко А.В.

П12 Технологічні та екологічні аспекти окремих операцій процесу спорудження свердловин: монографія / А.В. Павличенко, Є.А. Коровяка, А.О. Ігнатов; М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». – Дніпро: Журфонд, 2024. – 120 с.

ISBN 978-966-934-584-4

DOI: 10.33271/DUT.010

У роботі досліджено основні процеси, що відбуваються при спорудженні свердловин різного призначення – від механіки руйнування гірських порід до організації циркуляції технологічних рідин і екологічних аспектів виробництва. Робота має комплексний характер, поєднує теоретичні засади, інженерні підходи та екологічну складову, спрямовану на підвищення ефективності й безпечності бурових процесів.

Призначена для фахівців, які займаються буровими роботами та проєктуванням технологій захисту навколишнього середовища, а також буде корисна студентам технічних навчальних закладів, зокрема нафтогазового, геологорозвідувального і екологічного профілів.

УДК 622.244.4

ISBN 978-966-934-584-4

© А.В. Павличенко, Є.А. Коровяка,
А.О. Ігнатов, 2024

© Національний технічний університет
«Дніпровська політехніка», 2024

ЗМІСТ МОНОГРАФІЇ

	Вступ.....	4
<u>Розділ 1</u>	<u>Вивчення окремих питань процесів руйнування гірських порід на вибої та транспортування продуктів руйнування при спорудженні свердловин різного призначення.....</u>	7
<u>1.1</u>	Характеристичні відомості про особливості процесів спорудження свердловин.....	7
<u>1.2</u>	Базові поняття щодо застосовуваних способів руйнування гірського масиву при бурінні свердловин.....	12
<u>1.3</u>	Циркуляційні процеси при спорудженні свердловин в різних геолого-технічних умовах.....	17
<u>1.4</u>	Визначення підходів до вдосконалення процесів руйнування гірських порід та очищення свердловин при їх бурінні.....	25
	Загальні висновки до розділу 1.....	33
<u>Розділ 2</u>	<u>Визначення передумов підвищення механічної швидкості буріння як основи розробки прогресивних способів руйнування гірського масиву.....</u>	33
<u>2.1</u>	Питання фізики процесів руйнування гірських порід.....	33
<u>2.2</u>	Дослідження процесу руйнування гірських порід на вибої при бурінні свердловин.....	39
	Загальні висновки до розділу 2.....	49
<u>Розділ 3</u>	<u>Деякі аспекти створення раціональних схем циркуляції спеціальних технологічних рідин при спорудженні свердловин.....</u>	51
<u>3.1</u>	Вивчення особливостей підходів до розробки порядку організації циркуляційних процесів при спорудженні свердловин.....	51
<u>3.2</u>	Розгляд окремих питань раціоналізації алгоритму проектування режимів циркуляційних процесів при спорудженні свердловин різного призначення.....	72
	Загальні висновки до розділу 3.....	97
<u>Розділ 4</u>	<u>Проблематика екологічних питань спорудження свердловин різного призначення.....</u>	98
<u>4.1</u>	Деякі характеристики процесу порушення нормального стану довкілля при спорудженні свердловин.....	98
<u>4.2</u>	Вивчення особливостей природоохоронних технологій при спорудженні свердловин та основних вимог до них.....	103
	Загальні висновки до розділу 4.....	110
	Висновки та рекомендації.....	112
	Список умовних скорочень.....	115
	Список літератури.....	116

ВСТУП

Представлений до вашої уваги науково-практичний доробок є всебічним дослідженням, що присвячено вивченню окремих аспектів реалізації обов'язкових механічних (це руйнування гірських порід) і гідравлічних циркуляційних (це здійснення процесів очищення вибою та стовбуру свердловини) процесів під час будівництва (зокрема буріння) та експлуатації свердловин різного призначення (залежно від типу корисної копалини) в складних геолого-технічних умовах, із дотриманням необхідних екологічних стандартів та технологічних обмежень.

Проведений авторами аналіз значної кількості науково-технічних джерел, відносно нинішнього стану справ у галузі спорудження свердловин, вказує на наступне. На сучасному етапі достатньо інтенсивного розвитку теорії і практики бурових геологорозвідувальних робіт, а також видобувної нафтогазової промисловості, спостерігається стабільна тенденція швидких змін геолого-технічних і технологічних умов буріння свердловин. Вказане виступає наслідком значного збільшення середньої глибини свердловин, споруджуваних для отримання різноманітних корисних копалин і, як результат, суттєвого зростання температури і тиску в свердловинах. Відомо, що процеси буріння свердловин є капіталомісткими і можуть супроводжуватися небезпечними ускладненнями та аваріями, а втрати таких об'єктів як свердловини через неправильні технічні рішення на різних етапах їх проектування та будівництва є неприпустимими.

До основних завдань будівництва свердловин можна віднести створення герметичних, міцних, довговічних і екологічнобезпечних експлуатаційних каналів, які з'єднують продуктивні пласти з поверхневим видобувним обладнанням при мінімальних витратах. Серед найбільш передових інженерних технологій для досягнення позначеної мети є похило-скероване буріння. Відмічена технологія буріння – це комплекс методів, прийомів та апаратурно-технічних засобів, які дозволяють споруджувати свердловини в заданому напрямку, по чітко визначеній траєкторії, з максимальною точністю відносно можливих допустимих відхилень і спрямування вибою на точку, визначену геолого-технічним проєктом.

Максимальна продуктивність, ефективність та екологічність виконання окремих етапів процесу буріння свердловин залежать від сукупності взаємопов'язаних чинників і визначаються величинами осьового навантаження на інструмент, який руйнує породу (для експлуатаційного буріння це бурові долота різних конструкцій, для геологорозвідувального – бурові коронки або колонкові долота), частотою обертання цього інструменту, витратою промивальної рідини та фізико-хімічними параметрами її якості. Складні умови роботи різних типів інструментів (породоруйнівного інструменту, бурильних труб тощо) і наземного обладнання під час буріння та експлуатації свердловин, особливо при ліквідації ускладнень (утруднення поглиблення свердловини через порушення її стану), а також аварій, накладають певні специфічні вимоги до процесу виконання бурових та суміжних робіт з дотриманням відповідних технологічних і екологічних норм.

Необхідно також позначити, що вибір найбільш раціонального методу буріння свердловин – різних груп за промисловим призначенням – базується на потребі детального аналізу їх конструкції, геолого-технічних умов створення свердловин в товщі гірських порід (часто значно ускладнених), вивченні

можливих екологічних ризиків та оцінці техніко-економічних показників процесу буріння. Основним критерієм ефективності прийнятого до застосування методу буріння є мінімізація собівартості одиниці довжини проходки при повному виключенні ускладнень і аварій, а також порушень норм екологічної безпеки.

До найбільш дієвих та перспективних шляхів істотного підвищення рівня техніко-економічних показників процесу буріння свердловин, зокрема вельми показової механічної швидкості поглиблення стовбуру свердловини, є впровадження прогресивних конструкцій різних бурових інструментів та передових технологій. Сучасні конструкції породоруйнівного інструменту, що володіють вдосконаленими техніко-технологічними характеристиками, дозволяють не лише значно підвищити швидкість проходки свердловини, але також істотно скорочують витрати енергії, знижують рівень зношування бурового інструменту і обладнання та зменшують ризики виникнення ускладнень.

Використання передових технологій буріння – із застосуванням високоефективного породоруйнівного інструменту – та реалізація раціональних параметрів гідравлічної програми промивання, дозволяє значно знизити фінансове навантаження, пов'язане із забезпеченням процесу буріння витратними матеріалами та зменшити час, необхідний для виконання кожного окремого етапу бурових робіт. Розглянуте, у свою чергу, формує підґрунтя для підвищення продуктивності і зниження загальних витрат на буріння.

Необхідно позначити, що серед численних технологічних циклів, які супроводжують операції зі спорудження свердловин різного призначення, особливе місце займає наявність циркуляції бурових промивальних рідин. Пояснити це можна винятковою роллю промивальних рідин у вибірних технологічних процесах. Зокрема в середовищі промивальних рідин відбуваються головні для буріння процеси руйнування гірських порід на вибої та формування стовбура свердловини. Рівень відповідності промивальних рідин наявним геолого-технічним умовам буріння буде визначати переважну більшість показників операцій зі спорудження свердловин, а саме: потенційна швидкість проходки, можливість оперативного запобігання ускладнень і аварій, раціональна тривалість терміну ефективної роботи бурового обладнання та інструментів, ступінь досконалості розмежування пластів, результативність освоєння продуктивних горизонтів, екологічна безпечність бурових робіт тощо.

На теперішньому етапі розвитку бурової справи промивальні рідини, як правило, ідентифікуються в якості багатокомпонентних систем, кожна складова яких певним чином відбивається на контрольованих технологічних властивостях і масштабності впливу промивальних рідин на найважливіші показники операцій зі спорудження свердловин. Аналіз наявних джерел інформації переконливо свідчить, що прогресивні технології приготування та регулювання властивостей бурових промивальних рідин набувають вельми високого рівня наукової та практичної обґрунтованості, особливо для умов буріння глибоких розвідувальних і експлуатаційних свердловин на тверді, рідкі, а також газоподібні корисні копалини. До головних завдань, виконання яких повинні забезпечувати бурові промивальні рідини, при цьому відносять такі наступні: створення найбільш прийнятних умов стабільної роботи всієї номенклатури застосовуваного бурового

інструменту і самої бурової установки, зменшення або повне усунення виникнення ризиків аварійних ситуацій в свердловині та на поверхні, активне сприяння збереженню цілісності стовбура свердловини на всіх етапах виконання різноманітних операцій зі спорудження свердловини.

Практично обґрунтоване управління основними технологічними властивостями бурових промивальних рідин є одним з ключових принципів успішного виконання бурових робіт, адже воно безпосередньо впливає на ефективність, безпечність та економічність процесу спорудження свердловин. Таке цілеспрямоване і правильне управління полягає в точному контролі складу бурових промивальних рідин, яке забезпечує підтримку на належному рівні необхідних фізико-хімічних характеристик, відповідних різним свердловинним умовам. Слід підкреслити, що навіть доволі незначні зміни у компонентному складі промивальної рідини можуть стати причиною виникнення помітних порушень нормального ходу поглиблення вибою, а саме: суттєве погіршення стану стабільності стінок свердловини, відхилення від проєктних значень показників процесу очистки промивальних рідин від бурового шламу і т.д.

До факторів управління технологічними властивостями бурових промивальних рідин можна віднести: моніторинг і корегування хімічного складу (відстеження рівня концентрації різних компонентів), що дозволяє не тільки надійно підтримувати необхідні властивості промивальної рідини, а й коригувати їх в залежності від термобаричних і геологічних умов, а також глибини свердловини; контроль реологічних властивостей промивальних рідин, який забезпечує підтримку раціонального режиму циркуляції та дозволяє реалізовувати ефективну очистку і регенерацію промивальних рідин; забезпечення зниження витрат на матеріали і хімічні реагенти за рахунок використання ефективних добавок (спеціальні інгібітори та стабілізатори), яке дозволяє значно скоротити достатньо значні фінансові витрати на організацію циклу промивки свердловини; уникнення аварійних ситуацій, пов'язаних із забезпеченням стабільності стінок свердловини та захистом від викидів газу або нафти. Тут необхідно позначити наявність ще такої обставини, як неухильне дотримання вимог нормативних актів щодо охорони навколишнього середовища, що потребує застосування екологічно чистих промивальних рідин: позначене також стає важливим напрямом робіт складного циклу проєктування процесів видобутку корисних копалин свердловинними методами із виключенням негативного впливу на довкілля. Таким чином, досягнення необхідних показників промивальних рідин неодмінно передбачає проведення попереднього лабораторного дослідження і точного підбору компонентів, що дозволяє раціоналізувати процес спорудження свердловин і знизити витрати часу, а також ресурсів на його реалізацію.

Розглянуті матеріали є не лише оригінальним доробком авторів, вони також містять окремі аспекти існуючої на цей час теорії та практики формування вибою і застосування промивальних рідин в процесах спорудження свердловин, про це яскраво свідчать згадані у списку літератури та процитовані джерела інформації.

Вважається авторами за необхідне висловити вдячність науковцям НТУ «Дніпровська політехніка», які надали корисні поради, а також В.О. Расцветаєву, В.В. Яворській та І.К. Аскерову за підготовку рукопису до друку.

РОЗДІЛ 1. ВИВЧЕННЯ ОКРЕМИХ ПИТАНЬ ПРОЦЕСІВ РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД НА ВИБОЇ ТА ТРАНСПОРТУВАННЯ ПРОДУКТІВ РУЙНУВАННЯ ПРИ СПОРУДЖЕННІ СВЕРДЛОВИН РІЗНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

1.1 Характеристичні відомості про особливості процесів спорудження свердловин

Беручи до уваги реалії нинішнього етапу розвитку промислового сектору економіки нашої держави, можна обґрунтовано вважати, що виключно нафтогазова та гірничо-видобувна галузі, із якомога масштабним впровадженням в засади їх функціонування інноваційних технологій, норм сталого раціонального природокористування, а також основних принципів екологічної безпеки, можуть і повинні розглядатися найбільш важливими структурними елементами індустрії України та її провідними фінансовими джерелами.

Важливо підкреслити, що видобуток корисних копалин неможливий без проведення робіт з будівництва свердловин різних груп за призначенням [1]. Стосовно розкриття сутності останнього твердження, то призначенням свердловини, як специфічного класу гірничих виробок, виступає пошук родовищ, отримання вичерпних геологічних відомостей про поклад, створення промислового комплексу вилучення необхідних компонентів з надр, також не слід залишати поза увагою можливість застосування свердловин в якості інструменту виконання гірничотехнічних та інженерно-геологічних робіт. Разом із позначеним, аналіз літературної та доступної виробничої інформації яскраво свідчить про те, що натеper спостерігається тренд істотної зміни геологічних і технологічних факторів, які мають безпосередній вплив на процес буріння свердловин. Позначене полягає в суттєвому збільшенні середніх значень глибин споруджуваних свердловин, що цілком закономірно призводить до зміни, зокрема, термобаричних характеристик на вибої та в стовбурі розглядуваних гірничих виробок. Таким станом справ, власне, і можна пояснити наявність великої кількості прикладних наукових досліджень, а також виробничих розробок, пов'язаних із необхідністю: безперервного вдосконалення прогресивних технологій спорудження свердловин різного призначення; розвитку технічних засобів; впровадження інноваційних конструкційних матеріалів тощо [2].

Різноманітні процеси циклу спорудження свердловин різного призначення вимагають особливої уваги до себе, оскільки є достатньо складними з техніко-технологічної точки зору, потребують значних фінансових вкладень та пов'язані з можливістю виникнення серйозних свердловинних ускладнень, а також навіть аварій (до останніх можна віднести: раптові припливи пластових флюїдів, явища поглинання бурових промивальних рідин різної інтенсивності, свердловинні прихвати бурильного інструменту та ін.) [3]. Тільки вчасне і дієве вирішення питань, які відносяться до проблематики попередження або усунення свердловинних позаштатних ситуацій, дозволить досягти максимуму стосовно виконання запланованих геологічних завдань та створити надійну систему для

отримання корисних копалин свердловинними засобами [4]. Слід також підкреслити наступне: з огляду на присутність у складі бурових промивальних (більш ширше – спеціальних технологічних) рідин і пластових флюїдів спектра агресивних компонентів, потенційна шкода від їх несанкціонованого потрапляння до навколишнього середовища, здатна виявитися надто великою [5].

Бурова свердловина представляє собою циліндричну гірничу виробку, що споруджується за допомогою спеціальних інструментів [6]. Розглядувана виробка (рис. 1.1) характеризується достатньо великою довжиною і відносно малим діаметром; для свердловини розрізняють гирло 1, стовбур 2 і вибій 3, причому циліндрична поверхня стовбура носить назву стінки свердловини 4, а для закріплення останніх застосовуються спеціальні обсадні труби 5 із заповненням утвореного затрубного простору тампонажним розчином 6.

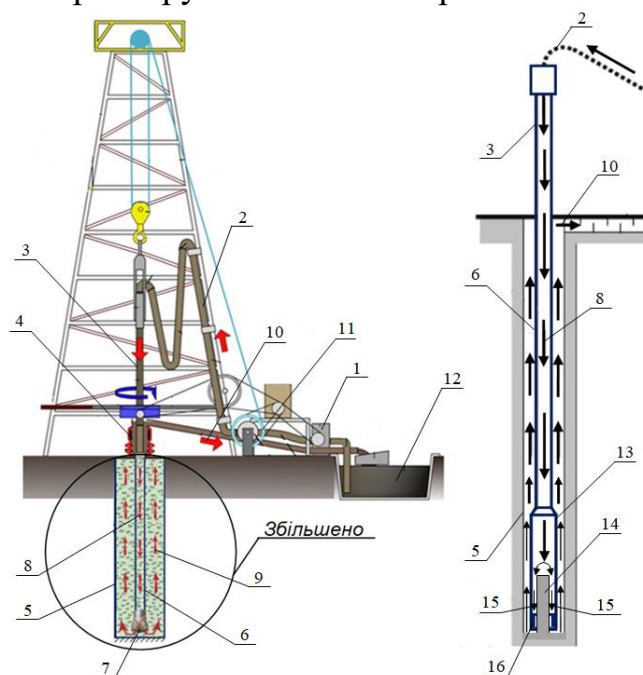


Рис. 1.1. Схема бурової свердловини, розташованої в товщі гірських порід

Деяке уявлення про сутність свердловинних технологій може дати термінологічне визначення для свердловини, як специфічної гірничої виробки. Вказане визначення полягає в тому, що буровою свердловиною виступає така гірнична виробка (за формою вона наближається до циліндру), яка відрізняється відносно малими поперечними розмірами (діаметр свердловини) та значною позовжною протяжністю (глибина свердловини). Найголовнішими характеристичними елементами свердловини є: гирло 1, тобто місце перетину вісі свердловини з денною поверхнею; вибій свердловини 3, так зване її дно; стінки свердловини 4, іншими словами бічні поверхні останньої; стовбур 2 розглядуваної виробки, деякий простір у земних надрах, який займає свердловина (рис. 1.1). Таким чином, для отримання розглянутої інженерної споруди в товщі гірських порід, необхідне проведення досить складних операцій з руйнування (буріння) породного масиву на вибої свердловини із метою його просування углиб. Отже

бурінням можна назвати процес створення свердловин (а також шпурів і шахтних стовбурів) шляхом руйнування гірської породи [7].

Процеси спорудження свердловин різнопланові, проте серед їх великої кількості можна виділити декілька основних, а саме: руйнування гірського масиву та видалення зруйнованої породи з вибою і стовбуру розглядуваної специфічної виробки – здебільшого, за допомогою промивальних рідин (ПР).

Можемо з упевненістю стверджувати наступне: виключно видобувна промисловість (сюди ми включаємо неодмінну її складову – геологорозвідувальні роботи) забезпечує сировиною (руди металів та нерудні копалини) і паливом (вугілля, нафта і газ) відповідний попит різних виробництв і побутових споживачів у корисних копалинах [8]. Проведення робіт з видобутку корисних копалин неможливо собі уявити без здійснення операцій зі спорудження свердловин, функціями яких виступає, власне, пошук перспективних родовищ, отримання вичерпних геологічних відомостей про поклад, створення рентабельного промислового комплексу вилучення необхідних компонентів з надр. Стосовно призначення свердловин, як специфічного класу гірничих виробок, воно не обмежується лише згаданим нами колом функцій, до нього також включають, серед іншого, виконання гірничотехнічних та інженерно-геологічних робіт. Досить значна номенклатура типів видобувних корисних копалин (здебільшого тут присутній вплив їх фізичних і хімічних властивостей), геологічних особливостей розташування їх покладів в земних надрах, а також техніко-технологічних прийомів спорудження різних за призначенням свердловин, потребують застосування деяких важливих попереджувальних заходів, спрямованих на усунення появи причин порушення екологічної рівноваги [9].

Наведена нами інформація є переконливим свідченням наявності необхідності спорудження значної кількості свердловин, які будуть відрізнятися своїми загальними та індивідуальними характеристиками. Саме це і виступає причиною значної уваги практиків і науковців до проблематики раціоналізації окремих процесів отримання в гірському масиві розглядуваних специфічних гірничих виробок, що достатньо аргументовано впливає з аналізу численних науково-практичних публікацій і досліджень у сфері свердловинних робіт та інших суміжних напрямків, зокрема охорони довкілля.

До свердловин ставиться ряд вимог, які формулюються з огляду на потребу здійснення названими виробками певних геолого-промислових завдань [10], окреслити які можна наступним чином: отримання в товщі гірських порід (ГП) експлуатаційно-придатного каналу сполучення із глибинним покладом різного генезу, виконання завдання кернового випробування геологічного розрізу, вирішення проблемних питань інженерно-геологічних вишукувань і підготовки територій для потреб будівництва різноманітних інфраструктурних комплексів та комунікацій, причому, названі цикли повинні виключати явища порушення екологічної рівноваги геологічного простору [11].

Виходячи з сутності оглянутих нами аспектів видобувної галузі, необхідно позначити, що на кожному з послідовних етапів здійснення технологій отримання корисних копалин відповідним сервісним службам необхідно спроекту-

вати покроковий раціональний регламент, а виконавцям його реалізувати із повним вирішенням питань геологічного, геохімічного, фізико-хімічного, еколого-природного та еколого-техногенного характеру. Тут на заваді можуть стати і природні особливості комплексного циклу спорудження свердловин окремих груп, які викликаються великими глибинами розглядуваних виробок, високими тисками і температурами в них, надмірною сприйнятливістю оточуючим середовищем порушень рівноваги геологічного простору.

Ефективне здійснення необхідних природоохоронних вимог до циклу видобування (або інших подібних робіт) загалом і процесів спорудження свердловин різного призначення зокрема, може бути досягнуто на підставі впровадження надійних технічних, технологічних та екологічних процедур, скорегованих відносно наявних природно-кліматичних, географічних та геологічних особливостей конкретної промислової ділянки. Отже, неможливо дати собі уяву про подальший сталий розвиток окремих секторів видобувної промисловості без широкого застосування раціонально-побудованих технологій, що повністю корелюються із певними екологічними обмеженнями.

Для наступного адекватного формулювання складових алгоритму здійснення технологічних процесів видобутку різноманітних корисних копалин нам необхідно надати цим роботам деякі класифікаційні ознаки, які можуть, до прикладу, відображати агрегатний стан компонента який потрібно отримати. Більш детально пояснити вказане можна наступним чином. У достатньо численну групу вельми потрібних корисних копалин входять, за класичним визначенням, так звані тверді, до яких відносяться руди металів (чорних та кольорових), вугілля різних марок, хімічні сполуки, а також матеріали, що застосовуються в будівництві. Не можна пройти осторонь таких важливих для промисловості та побутових потреб рідких корисних копалин, до яких ми відносимо воду, вуглеводні (в означеній класифікації це нафта і газовий конденсат) [3]. Наприкінці потрібно згадати газоподібні речовини, а саме природні гази із їх найяскравішим представником – метаном (CH_4). Характеризуючи кожний з названих нами компонентів необхідно сказати, що всі вони для свого отримання з земних надр потребують застосування деяких спеціальних прийомів (у т.ч. також і екологобезпечних), технологічний зміст яких залежатиме від агрегатного стану конкретної копалини, глибини розташування покладу в товщі гірських порід, геолого-технічних і термобаричних умов проведення видобувних робіт на родовищі із неодмінним порушенням екологічної рівноваги геологічного простору, завданням щодо фізичних і хімічних властивостей кінцевого стану речовини та досконалості процесу її переробки.

Не дивлячись на велике різноманіття сучасних практик щодо реалізації процесів видобутку корисних копалин, роботи з геологічного пошуку, розвідки різних стадій та видобутку корисних копалин проводяться, здебільшого, шляхом спорудження гірничих виробок, до яких ми відносимо і бурові свердловини [12]. Відповідно до конкретного змісту проведення тих або інших робіт з освоєння родовищ, буде також доволі істотно змінюватися перелік техніко-

технологічних вимог та обмежень, які висуватимуться до процесів спорудження різних гірничих виробок певного призначення.

Приймаючи до уваги наявний виробничий досвід, ми можемо констатувати існування наступних підходів до побудови процесів видобутку корисних копалин, а саме: проведення циклу пошукових і розвідувальних робіт відбувається за допомогою бурових свердловин, а безпосередньо видобувні процеси реалізуються, в більшості випадків, із використанням капітальних гірничих виробок різного призначення та мети спорудження. Важливою обставиною тут виступає те, що спорудження в товщі гірських порід виробок певного класу повинно неодмінно відбуватися із застосуванням якомога раціональніших, а головне екологічно безпечніших інженерних методик, завданням яких є максимально можливе виключення вірогідності втрати родовища із паралельним забезпеченням комплексності виймання і переробки копалини.

На підставі означеного ми можемо стверджувати, що техніко-технологічні прийоми і методи отримання бурових свердловин повинні постійно удосконалюватися; останнє пов'язано із присутністю стійкої тенденції значного ускладнення геологічних умов спорудження свердловин (причиною тому виступає необхідність суттєвого збільшення об'ємів глибокого і надглибокого буріння, а також активного застосування похило-спрямованих і горизонтальних свердловин). Свердловини, як інженерні споруди, відрізняються своєю складністю за конструктивним оформленням та високою вартістю, а це потребує детального обґрунтування проєктного регламенту їх спорудження із конкретним змістовним наповненням кожної з його фаз. Базовими чинниками формулювання керівних вимог до свердловин є ідентифікація вказаної виробки, як об'єкта довготривалої, ефективної і безаварійної експлуатації на підставі дотримання принципів і норм технологічної, виконавчої та екологічної безпеки [13].

Надійною запорукою досконалості прийняття конкретних проєктних рішень відносно формулювання технологічних позицій раціонального регламенту спорудження певного типу свердловин є можливість оперування максимально вичерпними відомостями щодо: геологічних ознак родовища; конструктивного оформлення свердловини (варіанти її кріплення та цементування); заходів з недопущення потрапляння шкідливих речовин в оточуюче середовище; фізико-хімічних процесів, які мають місце при бурінні свердловин, а також при розкритті та випробуванні продуктивних пластів.

Гострим питаннями подальшого розвитку видобувної галузі є істотне підвищення ступеню ефективності спорудження свердловин, як специфічного класу гірничих виробок, базою якого повинно стати збільшення геологічної інформативності свердловин; вдосконалення принципів технічного і технологічного забезпечення процесів буріння; недопущення проявів свердловинних ускладнень; забезпечення проєктної якості кріплення та розкриття продуктивних пластів із якнайповнішим дотриманням норм екологічної безпеки.

Виходячи з сформульованого, повністю логічним буде пошук раціональних шляхів отримання різних за генезисом корисних копалин, місцезнаходженням яких є різні за глибиною розташування в земних надрах продуктивні гори-

зонти [4]. При таких умовах, в більшості випадків, єдиним підходом до здійснення процесів розробки родовищ буде розбудова високотехнологічного комплексу взаємодіючих промислових модулів для свердловинного виймання та різних схем переробки певних корисних компонентів із дотриманням на всіх стадіях багатofакторних екологічних обмежувальних вимог [14].

1.2 Базові поняття щодо застосовуваних способів руйнування гірського масиву при бурінні свердловин

Спорудження свердловин – вельми специфічних гірничих виробок, здійснюється за допомогою процесів буріння (рис. 1.2). Перебільшити роль бурових робіт в сталому розвитку видобувної галузі неможливо. Всі рідкі і газоподібні корисні копалини розвідують і доволі ефективно експлуатують за допомогою різноманітних конструкцій бурових свердловин; тверді корисні копалини розвідують в основному буровими роботами (а в окремих випадках і видобувають свердловинними методами). Поліметалічні руди, а також руди рідкісних і благородних металів розвідують буровими свердловинами в належному поєднанні з гірничорозвідувальними виробками (тут необхідно згадати про можливості геотехнологічних свердловинних методів) [15]. При будівництві різних за призначенням споруд широко застосовуються інженерно-геологічне буріння [16]; це далеко не повний перелік сфер застосування буріння, і, власне, свердловин.

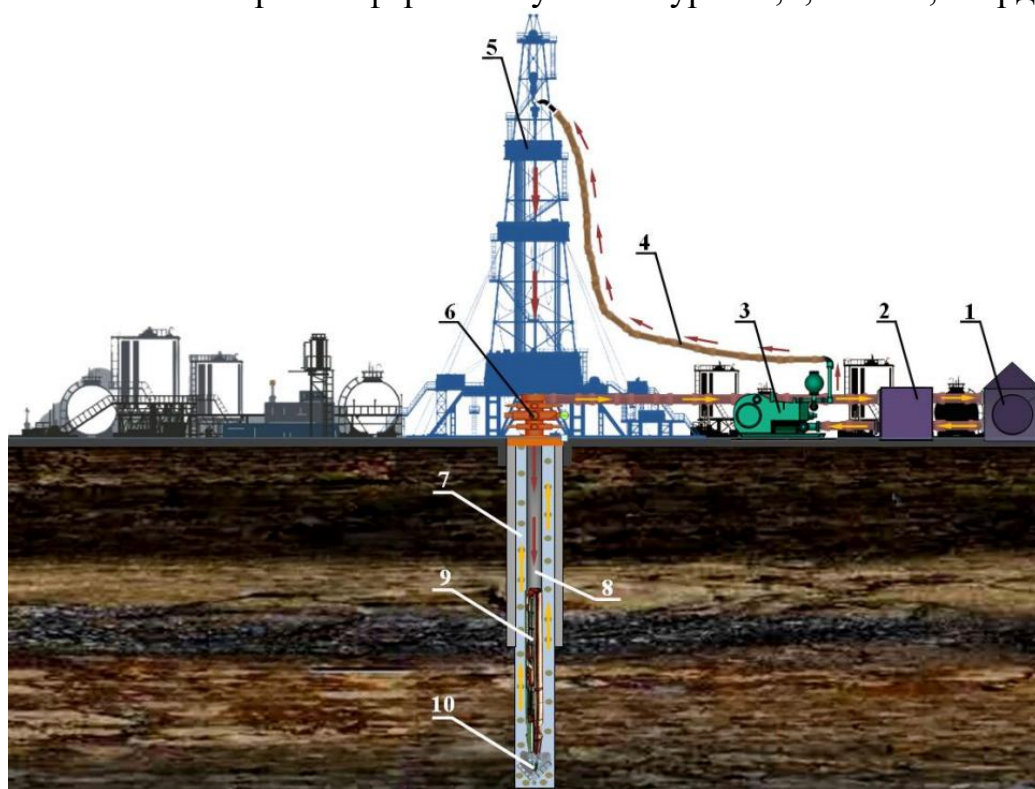


Рис. 1.2. Вигляд бурового майданчика із застосовуваним обладнанням та принцип організації циклу руху промивальної рідини: 1 – блок очищення та регенерації ПР; 2 – ємність для ПР; 3 – буровий насос; 4 – нагнітальний шланг; 5 – бурова вежа; 6 – блок противикидного обладнання; 7 – висхідний потік ПР; 8 – бурильна колона; 9 – генератор ударних імпульсів; 10 – бурове долото

Відповідно до свого призначення, бурові свердловини можуть бути розподілені на наступні основні типи [6]: розвідувальні – за допомогою таких свердловин здійснюються геологічний пошук і розвідка родовищ корисних копалин (вугілля, метали, хімічна сировина); експлуатаційні – їх призначенням виступає здійснення робіт з видобутку рідких (вода, розсоли, нафта, газовий конденсат) і газоподібних (суміш горючих газів, гелій та ін.) корисних копалин; геотехнологічні – застосовуються для проведення видобувних робіт на родовищах твердих корисних копалин за рахунок реалізації методів вилуговування, розплавлення і розчинення; інженерно-геологічні – призначені для вивчення основних фізико-механічних властивостей ГП перед початком робіт з будівництва різних споруд і комунікацій, а також проведення різнопланових досліджень з метою попереднього вивчення геологічного розрізу, активного моніторингу окремих результатів промислової діяльності, вивчення режимів і якості підземних вод; технічні (проведення робіт щодо заморожування пливунів, вентиляції підземних виробок, спорудження буронабивних паль, будівництва ЛЕП, пониження рівня підземних вод, скидання підземних вод в поглинаючі ГП і таке ін.).

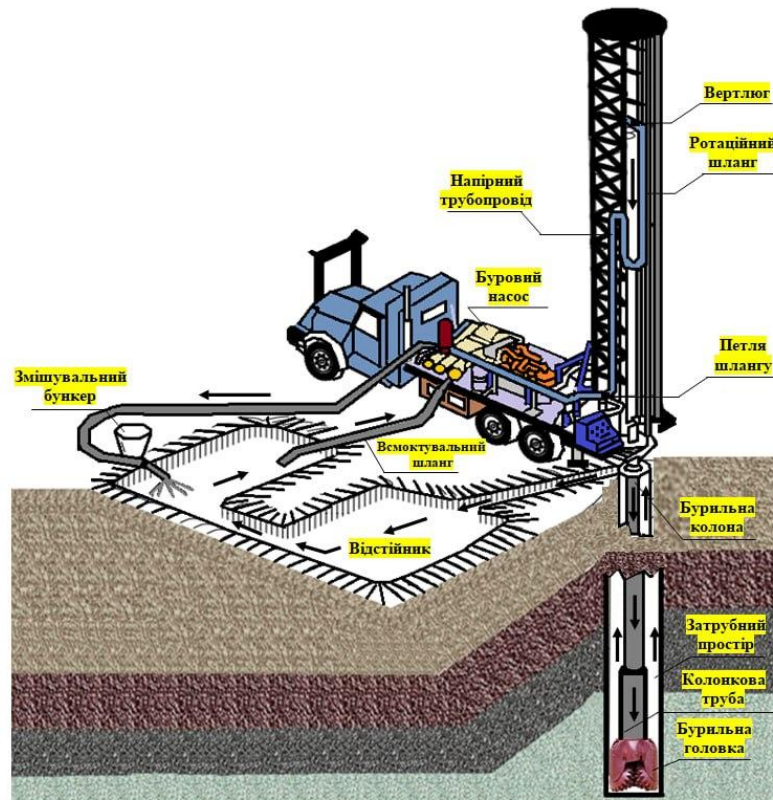


Рис. 1.3. Схематичне зображення обертального способу буріння свердловин із замкнутою схемою циркуляції промивальної рідини

Важливою обставиною обговорюваних тут питань є наявність доволі широкої номенклатури застосовуваних способів буріння свердловин, визначуваних, власне, механізмом здійснення відокремлення частинок гірської породи від масиву [17]. Натепер, в практиці спорудження свердловин різного призначення, найбільше розповсюдження отримав, у своїх численних інтерпретаціях,

саме механічний спосіб руйнування гірських порід, причому, в більшості випадків, реалізується він у варіанті обертального (рис. 1.3), при якому процеси руйнування гірського масиву на вибої споруджуваної свердловини ідуть за рахунок операцій різання, сколювання, дроблення і стирання відповідними елементами озброєння спеціального бурового породоруйнівного інструменту (до нього можна віднести: різні типи доліт обертального типу, алмазні і твердосплавні бурові коронки та ін.). Розглядуваний нами спосіб буріння свердловин, залежно від їх призначення та застосовуваного для них породоруйнівного інструменту (ПРІ), можна розділити на буріння суцільним вибоєм (або безкернове) та колонкове буріння (тобто кільцевим вибоєм) [18].

Надамо позначеному більш детальне пояснення. Відповідно до існуючої практики, буріння свердловин суцільним вибоєм полягає у тому, що руйнування гірської породи відбувається по всьому перерізу свердловини, при цьому гірська порода перетворюється на шлам, який піднімається, за різними схемами циркуляції, на поверхню за допомогою промивальної рідини або потоку повітря. Розглядуваний спосіб буріння застосовується переважно для спорудження глибоких експлуатаційних свердловин різного призначення, зокрема нафтових, газових, водозабірних, а також геотехнологічних, коли завдання отримання цілісного зразка гірської породи не є пріоритетним. До основних переваг способу буріння суцільним вибоєм необхідно віднести високу швидкість проходки, простоту технологічних операцій і можливість ефективного буріння у породах різної міцності та абразивності. Разом із вказаним, охарактеризований нами спосіб має суттєвий недолік – фізичну відсутність можливості одержання керна, що обмежує його застосування під час виконання робіт з геологічної розвідки [19].

На відміну від безкернового способу, колонкове буріння передбачає руйнування лише кільцевої частини вибою свердловини, внаслідок чого всередині спеціального породоруйнівного інструменту залишається незруйнований стовпчик породи, який, власне, і називають керном; останній періодично піднімають різними способами на поверхню і використовують для подальшого лабораторного визначення літологічного складу, фізико-механічних властивостей та інших характеристик гірських порід, що надзвичайно важливо при проведенні розвідувальних, інженерно-геологічних та гідрогеологічних робіт. Колонкове буріння забезпечує одержання повноцінної геологічної інформації про розріз, дає можливість вивчати будову і стан порід у природному заляганні, а також визначати межі покладів корисних копалин. Для цього способу застосовуються спеціальні колонкові коронки та керноприймачі, конструкція яких дозволяє з мінімальним пошкодженням відокремлювати kern від масиву породи.

Спосіб обертального буріння свердловин, як технологічний процес отримання названих специфічних гірських виробок шляхом обертання породоруйнівного інструменту, залежно від типу джерела обертального руху, може бути поділений на наступні види: з використанням поверхневого приводу та із застосуванням вибійних двигунів (ВД) різних конструктивних схем. У першому випадку джерелом обертального руху виступає приводний механізм, розташований на поверхні (ротатор, шпиндельний буровий верстат), а крутний момент пе-

редається бурильними трубами до вибійного бурового інструменту. Позначений нами спосіб передбачає, серед іншого, присутність високих механічних навантажень на бурильні труби, значне зношування різьбових з'єднань, деякі обмеження при глибокому бурінні; він є доволі ефективним для умов буріння відносно вертикальних свердловин. Другий вид обертального буріння – тобто буріння із вибійними двигунами – характеризується встановленням джерела обертання безпосередньо біля бурового інструменту, тобто в інтервалі вибійної частини свердловини. В означеному випадку ВД опускається в свердловину на бурильних трубах, і передача потрібних величин частоти обертання і крутного моменту відбувається безпосередньо в зоні здійснення руйнування гірського масиву. Такий техніко-технологічний підхід дозволяє: значно знизити механічні навантаження на бурильну колону, здійснювати буріння складних профілів свердловин, ефективно працювати на великих глибинах [20].

У групу ВД, що активно застосовуються в буровій справі, або розроблені в якості промислових зразків, входять турбобур, гвинтовий двигун, електробур, гідровібратор та ін. Турбобур працює за рахунок використання енергії потоку бурової ПР, що проходить через лопаті спеціальних турбінних секцій, створюючи при цьому обертання з високою частотою (до 1000 об/хв) і крутий момент, які передаються, безпосередньо, на породоруйнівний інструмент; реактивний момент, що виникає під час роботи турбобура, передається через його корпус на жорстко закріплені в роторі на поверхні бурильні труби. Гвинтовий двигун, укрупнено, складається з ротора і статора зі спіральним профілем, представляючи собою обернений гвинтовий насос; такий двигун забезпечує обертання з низькою частотою, але з достатньо високим крутним моментом. Гвинтові двигуни особливо ефективні при спорудженні криволінійних ділянок стовбура свердловини при похило-скерованому бурінні. Електробур обладнаний, ізольований за певним принципом, електродвигуном, який живиться через кабель, розміщений окремими відрізками в бурильних трубах. Такий двигун позитивно відрізняє незалежність величин потужності і частоти обертання від об'єму циркулюючої в привибійній частині свердловини промивальної рідини та її властивостей; також слід позначити, що комплекс електробуріння дозволяє використовувати спеціальні технічні засоби при бурінні похилих свердловин. Також існують, адаптовані до конкретних геолого-технічних факторів, комбіновані конструктивні вузли, які органічно поєднують між собою механічні, електричні та гідравлічні принципи впливу на породний вибій свердловини для підвищення ефективності буріння, особливо, в складних умовах [21].

У підсумку потрібно підкреслити наступне: використання вибійних двигунів дозволяє ефективно контролювати напрямок свердловини, знижує навантаження на бурильну колону та покращує енергоефективність процесу. Такий підхід є особливо важливим для глибокого, зокрема, похило-спрямованого та горизонтального буріння свердловин різних груп за призначенням.

До механічних способів руйнування гірського масиву відносять також і ударно-канатне буріння (не дивлячись на його давнє походження, воно і тепер знаходить практичне застосування в окремих випадках, коли інші методи є не-

достатньо ефективними або економічно недоцільними) [8], що полягає в руйнуванні гірської породи ударами спеціального бурового інструмента, такого як спеціальні ударні долота (іноді застосовують так звані бурові стакани), які опускаються у свердловину і приводяться в дію за допомогою сталевих канатів шляхом його багаторазового підйому та різкого опускання. Подрібнена ударним долотом порода (шлам) видаляється на поверхню за допомогою желонки різних конструкцій (в загальному випадку цей інструмент являє собою металеву трубу, нижній кінець якої обладнано зворотним клапаном, а верхній – проушиною для кріплення до ходового каната; причому у м'яких гірських породах желонка може виконувати також і функцію породоруйнівного інструмента. Головними перевагами розглядуваного способу є: простота бурового обладнання та інструменту, можливість застосування в різних геологічних умовах, а також здатність отримувати свердловини достатньо великого діаметра; проте ударно-канатне буріння має і помітні недоліки, серед яких найбільш значущими виступають низька механічна швидкість проходки стовбура свердловини та значна енергоємність процесу руйнування гірської породи на вибої.

Поміж значної кількості механічних способів буріння свердловин важливе місце займає ударно-обертальний, що пояснюється його ефективністю та багатифункціональністю [22]. Позначений спосіб буріння передбачає, при своїй реалізації, одночасний вплив на гірську породу ударної та обертальної сил. Досягти вказаного можна за рахунок роботи на вибої свердловини гідро- або пневмоударника, які, завдяки особливостям свого конструктивного виконання, здатні наносити удари (з певними енергетичними показниками) по буровому інструменту, оснащеному, до прикладу, твердосплавними різцями. Присутність одночасного обертання бурового інструмента забезпечує рівномірне дроблення гірської породи на вибої свердловини. Такий спосіб вдало поєднує ефективність ударного буріння з основними перевагами обертального, що дозволяє значно підвищити швидкість проходки свердловин (різного призначення), зменшити зношування бурового інструменту та забезпечити стабільну роботу останнього навіть у твердих, тріщинуватих гірських породах.

Слід позначити, що в певних умовах можливе застосування так званого вібробуріння (при ньому на буровий інструмент діють одночасно обертальний рух і вертикальні коливання), сутність якого полягає у зануренні віброзанурювачем (вібратором або вібромолотом) породоруйнівного інструмента із швидкістю від 0,1 до 2 м/хв і більше. Під дією вібрацій (з частотою 1250 - 2000 коливань за хвилину) в ґрунті виникають фізичні процеси, які значно зменшують сили тертя та взаємного зчеплення частинок. У результаті ґрунт розріджується, що різко знижує опір між породоруйнівним інструментом і стінками свердловини. Після витягування інструмента на поверхню з нього можна також отримати зразки гірської породи з непорушеною природною структурою [6].

Для певних геолого-технічних умов група відносно нових фізичних способів буріння вважається достатньо конкурентоспроможною порівняно з традиційними, розглянутими раніше, механічними методами. До таких способів належать, серед інших, термічні, вибухові, гідравлічні, електрофізичні та компле-

ксні методи буріння; їхня ефективність визначається здатністю використовувати енергію фізичних процесів – теплових, вибухових, електричних або гідродинамічних – для руйнування порід без прямого механічного контакту. Завдяки цьому зменшується зношування бурового інструменту, підвищується швидкість проходки свердловин і стає можливою робота в умовах, де механічне буріння малоефективне (наприклад, у надтвердих або неоднорідних породах) [23].

Виокремлюються серед інших комплексні методи буріння свердловин, які поєднують в собі кілька фізичних (або механічних) принципів дії, що дозволяє раціоналізувати процес буріння та підвищити енергоефективність.

1.3 Циркуляційні процеси при спорудженні свердловин в різних геолого-технічних умовах

В обов'язковому порядку застосовувані під час буріння свердловин промивальні рідини (в більш широкому сенсі – очисні агенти) є складними фізико-хімічними дисперсними системами з великою поверхнею розділу фаз [24]. Вони виступають середовищем, у якому відбуваються основні процеси буріння (утворення стовбуру свердловини в гірському масиві), та визначають ефективність використання потенціалу бурового обладнання і ПРІ, механічну швидкість проходки, а також ймовірність виникнення ускладнень різного типу.

Вибір раціонального типу ПР або очисного агенту (ОА) для конкретних геолого-технічних умов здійснюється з урахуванням комплексу вимог, виконання яких забезпечується реалізацією багатьох функцій названих систем, зокрема це: очищення вибою споруджуваної свердловини від уламків зруйнованої ГП та винос шламу на поверхню; утримання частинок зруйнованої ГП у завислому стані у стовбурі свердловини під час непередбачуваної зупинки циркуляції ОА; надійне (з потрібним терміном) закріплення нестійких стінок стовбура свердловини та запобігання їх обваленню; активний фізико-хімічний вплив на ГП вибою свердловини, який полегшує їх руйнування; охолодження бурового інструмента, що знижує його зношування; утворення тонких мастильних плівок на поверхні бурильних труб і елементів бурового обладнання, яке сприятиме зменшенню тертя та енергетичних витрат під час буріння свердловин [25].

Ефективне виконання позначених функцій ПР можливе на підставі того, що вони мають відповідати певним вимогам до своїх властивостей, а саме: густини, в'язкості, структурно-механічних характеристик, стабільності тощо. Позначені показники будуть залежати від компонентного складу ПР як дисперсної системи та співвідношення фаз у цій системі [26].

У сучасній практиці спорудження свердловин різних груп призначення застосовуються багато типів ОА – водні, глинисті, полімерні, емульсійні, піністі, а також розчини на вуглеводневій або комбінованій основі. Вибір конкретного типу визначається геологічними умовами, глибиною свердловини, температурним режимом і властивостями порід, що розбурюються. Правильно підібрана ПР забезпечує стабільність свердловини, ефективне очищення вибою, зменшення аварійності та продовження ресурсу бурового інструменту [27].

Потрібна витрата бурового очисного агента (у вузькому технічному розумінні цього визначення – промивальної рідини) є одним із ключових параметрів режиму буріння (ПРБ), який має таке ж значення, як осьове навантаження на ПРІ або частота обертання бурового снаряда (БС) [28]. Позначений показник визначає ефективність очищення вибою споруджуваної свердловини, стабільність стінок останньої та якість процесу винесення шламу на поверхню. Раціональна витрата ПР забезпечує сталість режиму циркуляції, зменшує ризик виникнення ускладнень (сальнікоутворення, прихоплення інструменту, обвали), а також сприяє охолодженню ПРІ й підвищенню його ресурсу. Надлишкова подача ОА може призвести до перевитрат енергії, ерозії стінок стовбура свердловини або порушення рівноваги пластових тисків, тоді як недостатня – до неефективного очищення вибою свердловини і зниження швидкості проходки. Тому правильне регулювання витрати ОА є невід’ємною складовою раціоналізації режиму буріння та підтримання технічної безпеки вказаного процесу.

Спорудження свердловин неминуче супроводжується утворенням шламу – тобто подрібненої ГП, що з’являється внаслідок дії ПРІ на вибій та стінки свердловини. Саме наявність і кількість шламу суттєво впливають на ефективність процесу буріння, особливо у складних гірничо-геологічних умовах.

Результативність буріння значною мірою визначається також і якістю системи очищення вибою та ефективністю циркуляції очисного агента (ОА), який повинен забезпечувати повне та безперервне видалення шламу із зони буріння. Якщо процес очищення організовано недостатньо ефективно, відбувається накопичення вибуреної породи у свердловині, а це може призвести до зниження швидкості проходки, підвищення крутного моменту, прихоплення бурового інструменту або навіть порушення цілісності стінок свердловини [29].

Приймаючи до уваги позначене, повністю закономірним є те, що питання раціоналізації процесів очищення вибою та руху ПР є предметом численних наукових і практичних досліджень. У більшості з них головна увага зосереджується на визначенні необхідної швидкості висхідного потоку ПР, яка забезпечує ефективне винесення частинок вибуреної ГП без їх повторного осідання [30]. Така швидкість повинна узгоджуватися з щільністю, розміром частинок шламу ГП, в’язкістю та густиною ПР, а також геометрією стовбуру свердловини, що дозволяє підтримувати стабільний гідродинамічний режим циркуляції.

Витрата ПР визначає швидкість руху її висхідного потоку в різних перерізах стовбура свердловини та є одним із ключових ПРБ, що впливають на гідродинамічні умови процесу буріння. Саме від неї залежить, з якою інтенсивністю буде відбуватися очищення вибою, винесення шламу на поверхню, а також стабільність стінок свердловини. Повністю зрозуміло, що для кожних конкретних геолого-технічних умов існує раціональне значення витрати ОА, при якому забезпечується найвища ефективність буріння за мінімальних енергетичних і матеріальних витрат [31]. У випадку, коли витрата ПР нижча від раціонального свого значення, потік не має достатньої швидкості для повного видалення вибуреної породи, а це призводить до засмічення свердловини, підвищення механічного опору руху бурового інструмента в стовбурі свердловини і зниження

швидкості проходки. Надмірна кількість ПР, що подається в стовбур свердловини, навпаки, спричиняє перевитрату енергії бурових насосів, ерозію стінок стовбура свердловини, порушення рівноваги тисків в ньому.

Тому визначення раціональної витрати ПР є важливим етапом проєктування режиму буріння, що потребує врахування, зокрема в'язкості ОА, щільності і розмірів частинок шлам, діаметра свердловини, глибини буріння та типу ПРІ. Правильно обрана витрата дозволяє забезпечити стійку циркуляцію, зменшити аварійність і підвищити техніко-економічні показники процесу буріння.

При прямій схемі циркуляції очисний агент (ОА) нагнітається буровим насосом або компресором у колону бурильних труб (БТ), по яких він рухається до вибою свердловини (рис. 1.4); далі ПР виходить через насадки долота (спеціальні промивальні канали інших конструкцій ПРІ) та під дією тиску і швидкості потоку змиває з вибою шлам. Після цього ОА разом із частинками шлам ГП піднімається кільцевим простором (затрубним простором) між бурильною колоною та стінками споруджуваної свердловини на поверхню, де проходить через систему очищення і регенерації; на поверхні з нього видаляються тверді частинки, а очищений ОА повторно подається в циркуляційну систему.

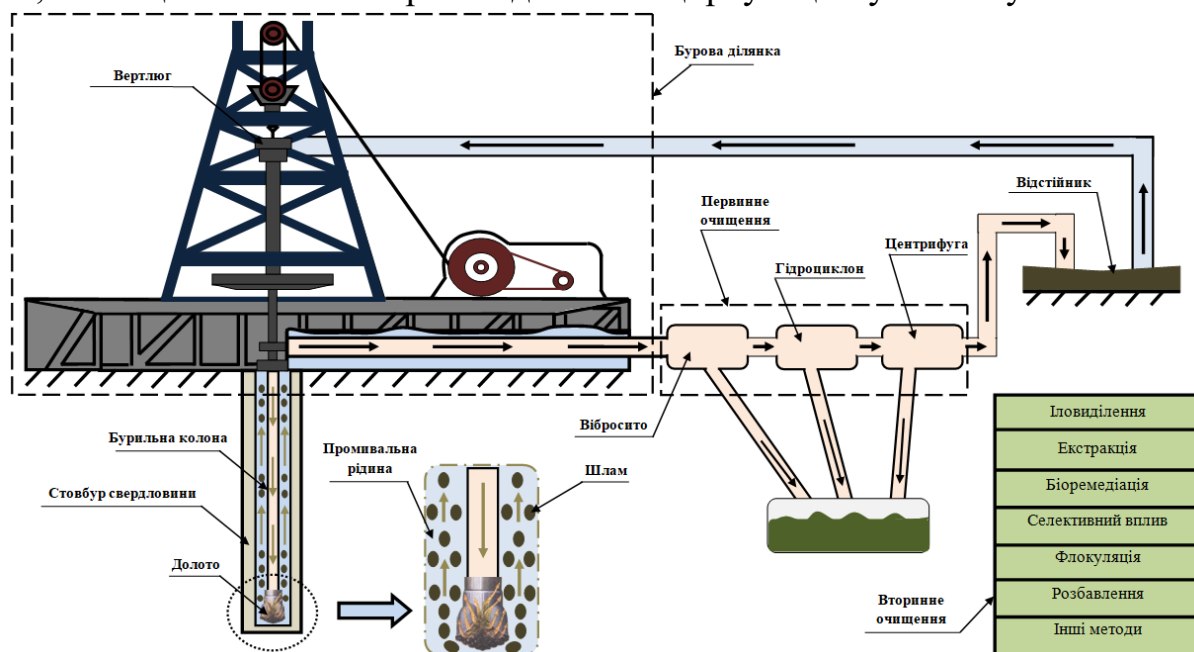


Рис. 1.4. Приклад схематичного зображення замкнутої схеми циркуляції промивальної рідини на буровій ділянці

Пряма схема циркуляції очисного агента (ОА) характеризується простотою конструктивного і технологічного оформлення, а також надійністю функціонування, що робить її поширеним і зручним рішенням у більшості випадків організації циклу спорудження свердловин [32]. Названа схема циркуляції забезпечує безперервність і стабільність процесу буріння, навіть у складних гірничо-геологічних умовах, зокрема при частковому або повному поглинанні ПР. Однак використання цієї схеми має й певні обмеження, що можна пояснити наступними специфічними характеристиками: для ефективного видалення шлам з вибою свердловини необхідно підтримувати високу швидкість висхідного по-

току ПР у затрубному просторі, особливо коли застосовуються ПР з низькою в'язкістю; разом із тим, у разі буріння в м'яких або слабозцементованих ГП це може спричинити ерозію та розмивання стінок стовбура свердловини, що ускладнює подальші роботи та знижує стійкість свердловини. При розвідувальному колонковому бурінні динамічний вплив потоку промивальної рідини негативно позначається на збереженні цілісності керна, особливо у породах м'якої та середньої міцності керна може руйнуватися або вимиватися потоком ПР. У разі раптового припинення циркуляції виникає небезпечна ситуація, коли шлам осідає у стовбурі свердловини; це створює потенційну загрозу прихоплення бурового снаряда (БС), що може призвести до зупинки буріння, втрати інструменту та значних технологічних простоїв. Отже, хоча пряма схема циркуляції є простою та ефективною, її застосування вимагає ретельного контролю параметрів потоку, характеристик ПР та стану ГП, щоб мінімізувати негативні наслідки та забезпечити стабільність процесу буріння свердловин.

Практикою спорудження свердловин встановлено наступне: якщо вміст шламу в ПР перевищує 5% за об'ємом, це загрожує аварією. Накопичення великої кількості шламу ГП на вибої свердловини негативно впливає на перебіг бурового процесу, зокрема призводить до помітного зниження механічної швидкості буріння. Шлам, що утворюється внаслідок руйнування порід ПРІ, у разі недостатнього очищення вибою утворює ущільнений шар між ГП та інструментом; це зменшує ефективність руйнування ГП, підвищує опір обертанню БС та призводить до додаткового зносу ПРІ. Крім того, надлишок шламу порушує гідродинамічний режим циркуляції ПР, що може спричинити нестабільність тиску, ускладнене винесення частинок шламу на поверхню і навіть підвищений ризик прихоплення інструменту. Усе це вимагає додаткових витрат і засобів, не дивлячись на те, що гідравлічна програма буріння повністю виконується [33].

При розбурюванні м'яких ГП (глин, крейди та ін.) може відбутися укрупнення дрібних частинок шламу шляхом їхнього злипання, у результаті чого різко знижується здатність ПР виносити продукти руйнування зі свердловини. Можуть бути й інші причини зниження транспортуючої здатності ПР внаслідок зменшення швидкості висхідного потоку, що призводить до погіршення очищення свердловини від шламу. Найчастіше це спостерігається в кавернозних інтервалах, у яких зниження швидкості висхідного потоку сприяє накопиченню в останніх шламу [34]. За наявності у свердловині однієї або декількох каверн, як правило, процес буріння супроводжується тривалими проробками вже пройденої бурінням ділянки стовбура свердловини і виносом великої кількості зруйнованої в стінках свердловини ГП, а також, паралельно вказаному, відбувається накопичення в кавернах шламу із відповідними негативними наслідками. Забезпечення виносу шламу збільшенням продуктивності бурових насосів (БН) у вказаних умовах виявляється малоефективним внаслідок різкого збільшення гідравлічних опорів та появи інших негативних явищ [35].

Для боротьби з ускладненнями зазвичай збільшують густину ПР. Однак раціональна величина збільшення густини ПР обмежена через те, що за вказаних умов зростає репресія на пласт, а це, в свою чергу, призводить до розкриття

тріщин та поглинання ПР. За явищ поглинання ПР, швидкість висхідного потоку доводиться вимушено знижувати, що знову провокує появу умов, коли шлам зруйнованих ГП не виноситься зі стовбура свердловини [36].

Вибір раціональної витрати має здійснюватися з урахуванням усіх обставин; він є важливим завданням, яке визначає ефективність процесу буріння. Мінімальна витрата ОА, в загальному випадку, повинна забезпечувати вирішення основних завдань відповідного технологічного циклу, а саме: очищення вибою та стовбуру свердловини від продуктів руйнування ГП, охолодження ПРІ. Величина витрати ПР повинна бути достатньою для надійного і стійкого транспортування шламу з вибою до гирла свердловини; вказаний параметр, за реалізації прямої схеми промивання, встановлюють, враховуючи один з рекомендованих параметрів: швидкість висхідного потоку в свердловині; питому витрату на одиницю діаметра ПРІ; залежно від конкретних умов буріння [37].

В основі численних наявних методик з розрахунку процесу винесення шламу при бурінні лежать відомі закономірності руху кулі в рідкому або газоподібному середовищі. Для визначення критичної швидкості руху частинки (більш коректно – деякого твердого тіла) в нерухомому об'ємі рідини запропоновано велику кількість формул (табл. 1.1) [2].

Таблиця 1.1.

Аналітичні залежності для визначення критичної швидкості осідання твердого тіла в рідині

Автор дослідження	Розрахункова формула	Умовні позначення	Примітки
Стокс	$u = \frac{d^2(\rho - \rho_p)g}{18\mu}$	d – розмір частинок; ρ , ρ_p – щільність матеріалу частинки породи і густина рідини відповідно; g – прискорення вільного падіння, μ – динамічна в'язкість рідини	Формула дійсна за числа Рейнольдса (Re), що не перевищує 1
П. Рітгінгер	$u = k \sqrt{d \left(\frac{\rho}{\rho_p} - 1 \right)}$	k – деяка постійна Рітгінгера	
К. Вільямс, К. Брус	$u = \frac{k}{1 + \frac{d}{D_{ек}}} \sqrt{\frac{h}{d} \left(\frac{\rho}{\rho_p} - 1 \right)}$	$D_{ек}$ – еквівалентний діаметр кільцевого простору, h – оптимальний розмір частинок	
Р.І. Шищенко, В.Д. Бакланов	$u = ak \sqrt{d \left(\frac{\rho}{\rho_p} - 1 \right)}$	a – коефіцієнт розширення стовбуру свердловини (1,1 - 1,3)	
Уокер, Мейєз	$u = \sqrt{\frac{2gd(\rho - \rho_p)}{1,12\rho_p}}$		
П.В. Лященко	$u = \frac{\nu}{d} \exp 10 \left(\frac{\sqrt{\ln Ar + 2,3}}{2,3} - 1 \right)$	ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості рідини; Ar – безрозмірний параметр Архімеда	

Більшість математичних формул, що застосовуються в інженерних розрахунках процесу промивання в бурінні, є наближеними, крім того, ці формули виведені з умови, що рідина, в якій осідають частинки, нерухома, а також у них не враховані обмеженість простору руху частинок [32].

На швидкість осідання частинок впливає ряд факторів, а саме: різниця щільності матеріалу частинок та густини ПР, розмір і форма частинок, в'язкість ПР, ефект турбулізації рідини у безпосередній близькості до частинки – ці фактори лише частково враховані в деяких запропонованих формулах. Наразі в практиці інженерних розрахунків необхідної швидкості висхідного потоку виходять з наступного – винесення частинок шламу по стовбуру свердловини відбувається в результаті виникнення сил взаємодії потоку ОА з твердим тілом.

Прогнозувати швидкість осадження частинок вибуреної породи досить складно. По-перше, через широкий діапазон розмірів частинок шламу; по-друге, внаслідок наявності для частинок найрізноманітніших форм, і, по-третє, тому, що більшість бурових розчинів за своєю природою відрізняються від ньютонівських рідин, для яких, здебільшого, проводилися дослідження.

Деякими дослідниками запропоновано графічний спосіб визначення параметрів режиму промивання (ПРП) за допомогою відповідних номограм, які побудовані за умови наявності постійних і змінних технологічних параметрів ПР [2]. За допомогою вказаних номограм є можливість вибрати раціональне співвідношення діаметра промивного каналу долота в залежності від: кількості подаваної на вибій ПР, величини тиску, який створюється на вибій струменем рідини, що виходить з промивного каналу долота та, безпосередньо, гідравлічних втрат в долоті. Вказаним методом також можна знайти раціональне співвідношення діаметрів насадок бурового долота і кількості ПР, що подається на вибій свердловини та створює гідромоніторний ефект [38].

Багато фахівців вважають, що при бурінні шарошковими долотами швидкість висхідного потоку ПР в свердловині не повинна перевищувати величини в 0,25 м/с. До прикладу, вважається [2], що швидкість висхідного потоку в затрубному просторі має бути не менше 0,35 - 0,40 м/с, а при форсованих режимах буріння він рекомендує мінімально допустиму швидкість довести до 0,7 - 0,8 м/с, щоб забезпечити максимальне очищення вибою від вибурених частинок та виключити можливість повторного передрібнення частинок ГП. Проте деякі автори підкреслюють, що ця швидкість має становити 1,45 - 0,50 м/с.

Ряд дослідників придержуються думки, що швидкість руху ПР в свердловині не повинна бути вище 1,2 м/с, оскільки перевищення вказаного значення спричинить активний розмив стінок свердловини. Вважається, що зазначена швидкість виступає граничною для м'яких, але стійких порід; для нестійких ГП пропонується знижувати вказаний параметр до 0,8 м/с. З досвіду буріння в США відомо, що зазначені межі швидкостей занижені, і стінки свердловини не розмиваються навіть за швидкості 4 м/с.

У загальному випадку, виходять з наступного [32]: при бурінні в глинах, глинистих сланцях і пісках швидкість висхідного потоку повинна становити 0,9 - 1,3 м/с, а при бурінні в скельних породах 0,7 - 1,0 м/с. Також рекомендується

дотримуватися наступних значень: при бурінні роторним способом під кондуктор швидкість висхідного потоку слід підтримувати на рівні 0,3 - 0,5 м/с, під технічну колону 0,5 - 0,8 м/с та під експлуатаційну 0,8 - 1,2 м/с.

Крім того, згідно із дослідженнями ряду авторів, питома витрата ПР (на одиницю площі вибою свердловини) при роторному способі та електробурінні повинна бути в межах 0,035 - 0,05 л/с, а при бурінні гідравлічними вибійними двигунами – не перевищувати значення в 0,07 л/с.

Проведений аналіз доводить очевидність того, що регламентовані швидкості висхідного потоку недостатньо диференційовані в залежності від літологічної характеристики ГП, основних технологічних показників властивостей ПР та геометричних розмірів кільцевого простору. У зв'язку із взаємозалежністю процесів гідротранспорту шламу і вибійних тисків від швидкості висхідного потоку, остання є основою проектного рішення, проте в традиційних гідравлічних розрахунках фігурує як вихідна інформація.

При бурінні з використанням рідких ОА охолодження ПРІ, як показують проведені дослідження [2], забезпечується за найменших витрат ПР (деякі особливості стосуються інструменту із алмазним озброєнням), і не визначає мінімум розглядуваного показника, загалом він вибирається з умови очищення вибою і винесення шламу по стовбуру споруджуваної свердловини.

Конкретні рекомендації стосовно величин витрат ПР, засновані на виробничому досвіді, не завжди зручні для використання через велику кількість поєднань типів і розмірів бурового інструменту та властивостей ГП, носять загальний характер, не охоплюють усі можливі випадки експлуатаційного і геологорозвідувального буріння, не мають зв'язку з іншими режимними ПРБ (частота обертання та осьове навантаження), а також не враховують розміри перерізу кільцевого простору споруджуваної свердловини [32].

Також слід зазначити деякі особливості промивання похилих свердловин [39]. Процеси очищення вибою та стовбура при бурінні вказаних свердловин дещо відрізняється від таких, характерних для вертикальних. У вертикальній свердловині навіть при незначному перевищенні швидкості руху потоку над швидкістю осідання частинок ГП спостерігається їхнє винесення зі свердловини. Зі зменшенням кута нахилу стовбура свердловини до горизонту, умови транспортування значно погіршуються через те, що проти сили тяжіння, яка викликає випадання частинок шламу на стінку свердловини, діє тільки частина сили швидкісного напору, а це веде до необхідності збільшення швидкості висхідного потоку, а, отже, і витрати ПР. Найбільш важкі умови транспортування спостерігаються в горизонтальних ділянках стовбура свердловини.

За даними деяких зарубіжних дослідників, при алмазному бурінні необхідно створювати швидкості висхідного потоку в породах, які розмиваються, у межах 0,3 м/с, а в відносно стійких 0,4 м/с. Збільшення швидкості висхідного потоку понад 0,5 м/с технологічно недоцільне та не матиме позитивних наслідків. Для розрахунку подачі БН, що забезпечує зазначені швидкості висхідного потоку, провідними зарубіжними фірмами прийнято формулу:

$$Q = qS, \quad (1.1)$$

де q – питома витрата ПР на одиницю площі зазору між БТ і стінками свердловини, S – площа затрубного зазору споруджуваної свердловини.

Питома витрата ПР (на одиницю площі вибою свердловини) змінюється не більше 1,8 - 3 л/хв; для нормальних умов буріння приймають $q = 2,4$ л/хв.

Виходячи зі сказаного, як провідний критерій раціоналізації витрати ПР можна застосувати потужність БН, що визначається перепадом тиску, продуктивністю БН і механічним ККД [25]

$$N = \frac{PV}{\eta}, \quad (1.2)$$

де P – робочий тиск БН; Q – об'ємна продуктивність БН; η – ККД насоса.

Констатуємо таке: витрату ПР, здебільшого, визначають виходячи:

а) з умови очищення вибою свердловини від вибуреної ГП

$$Q_1 = q_0 F_{\text{виб}}, \quad (1.3)$$

де q_0 – питома витрата ПР, м³/с на 1 м² вибою ($q_0 = 0,35 - 0,5$ – при роторному способі і бурінні електробуром; $q_0 = 0,5 - 0,7$ – при бурінні гідравлічними вибійними двигунами); $F_{\text{виб}}$ – площа вибою свердловини, м².

б) з умови транспортування шламу в кільцевому просторі

$$Q_2 = V_{\text{min}} F_{\text{кн}}, \quad (1.4)$$

де V_{min} – мінімально припустима швидкість руху ПР в кільцевому просторі, м/с (у скельних породах приймають $V_{\text{min}} = 0,7 - 1,0$ м/с; у м'яких $V_{\text{min}} = 1,0 - 1,4$ м/с; при бурінні долотами великого діаметра $V_{\text{min}} = 0,3 - 0,5$ м/с).

Гідравлічні втрати тиску в елементах циркуляційної системи визначають за наступною методикою [40]

$$P = P_m + P_{\text{кн}} + P_z + P_{\text{ОБТ}} + P_{\text{кнОБТ}} + P_{\text{обв}} + P_o, \quad (1.5)$$

де P – сумарні гідравлічні втрати тиску в циркуляційній системі, Па; P_m – втрати тиску в БТ, Па; $P_{\text{кн}}$ – втрати тиску в кільцевому просторі за БТ, Па; P_z – втрати тиску в замках і муфтах, Па; $P_{\text{ОБТ}}$ – втрати тиску в обважених бурильних трубах (ОБТ), Па; $P_{\text{кнОБТ}}$ – втрати тиску в кільцевому просторі за ОБТ, Па; $P_{\text{обв}}$ – втрати тиску в наземній обв'язці (стояку, буровому шланзі, ведучій трубі, вертлюзі), Па; P_o – втрати тиску в буровому долоті, Па.

Вивчення широкого кола літературних джерел та даних дослідницьких і виробничих організацій стосовно питань розробки гідравлічної програми промивання свердловин доводить [41], що вживані при бурінні ПР є складними фізико-хімічними дисперсними системами з сильно розвиненими поверхнями розділу фаз. ПР створюють середовище, в якому протікають основні процеси циклу спорудження свердловин, крім того вони визначають міру використання потенційних можливостей і ресурс бурового устаткування і інструментів, механічну швидкість, вірогідність виникнення різного роду ускладнень.

Можна констатувати з упевненістю, що в ускладнених геологічних умовах вибір типу ОА та режиму його циркуляції дещо утруднений, через необхідність дотримання вимог щодо виконання складних завдань із значними техніко-технологічними обмеженнями. Тут доречним буде деякий детальний розгляд подібних факторів, серед яких найбільш значущими будуть такі наступні: 1) за-

безпечення якісного очищення вибою споруджуваної свердловини від продуктів руйнування і винесення останніх на поверхню; 2) недопущення прояву процесів осідання частинок зруйнованої ГП на вибій свердловини при раптовому припиненні циркуляції; 3) надійне в часі закріплення нестійких стінок свердловини і оберігання її стовбура від порушень рівноваги залягання ГП; 4) активний фізико-хімічний вплив на гірський масив, за яким стоїть ціль полегшення його руйнування; 5) охолодження ПРІ та підтримання термогідралічного балансу; 6) прояв мастильних здатностей на поверхнях контакту та ін.

1.4 Визначення підходів до вдосконалення процесів руйнування гірських порід та очищення свердловин при їх бурінні

Класифікаційний аналіз сучасного етапу розвитку бурової справи, а особливо її ключового напрямку – процесів руйнування гірського масиву, переконливо свідчить про існування великої кількості методів і технологічних прийомів формування стовбура свердловини. Це різноманіття зумовлене, передусім, техніко-технологічними особливостями інструментального забезпечення бурового процесу, а також постійним удосконаленням технічних засобів, що застосовуються для підвищення ефективності проходки [42]. Таке становище є природним результатом багатofакторності завдань, які вирішуються під час буріння свердловин, і широкого спектра геолого-технічних умов, у яких воно здійснюється. До основних цілей буріння належать: отримання якісних зразків керна з породних та продуктивних горизонтів, що дає змогу виконувати достовірний петрографічний, фізико-хімічний та геолого-промисловий аналіз; створення надійного, стабільного та експлуатаційно-придатного каналу для підйому корисних копалин або вилучення флюїдів (нафти, газу, води) на поверхню; забезпечення довговічності стовбура свердловини, його стійкості до обвалів та деформацій; раціоналізація умов циркуляції ПР і мінімізація втрат енергії при роботі бурового і допоміжного обладнання. У результаті різноманіття методів буріння та технічних рішень відображає високий рівень спеціалізації сучасної бурової техніки, орієнтованої на адаптацію до конкретних геологічних умов, підвищення ефективності процесу та зниження собівартості буріння.

Враховуючи немалу капіталомісткість бурового циклу, яка визначається також і наявністю значних глибин та локалізацію відносно них протікання основних виробничих операцій процесу спорудження свердловин, увага дослідників концентрується на розробці таких способів буріння, що характеризуються максимальною безперервністю і автономністю [43]. Прокоментовано зазначене може так: спосіб буріння зобов'язаний відповідати критеріям стійкості ПРІ, яка дозволяє скоротити час на виконання допоміжних операцій, пов'язаних із заміню останнього; крім того, робота відповідного інструменту, повинна бути включена для впливу тих факторів, що порушують суворе додержання технологічного режиму. Досягненню сформульованих цілей, у звітній мірі, перешкоджає об'єктивний прояв достатньо широкої номенклатури фізико-механічних і хімічних властивостей гірського масиву при реалізації операцій його деформу-

вання [44]. Необхідно додати також наступне: в цілому процес буріння неодмінно пов'язаний із певними технологічними обмеженнями, що висувуються вимогами до свердловини, як капітальної гірської виробки та чітко окресленим діапазоном можливостей обладнання й інструменту.

Доступний фактичний матеріал відносно домінуючих тенденцій у розрізі практичних питань видобувної галузі, виявляє ту важливу обставину, що більшість практично застосовуваних способів руйнування ГП (у тому числі і при бурінні свердловин) ґрунтується саме на механічному розділенні гірського масиву на деякі фрагменти, того або іншого розміру, під дією місцевих руйнуючих зусиль, що за значенням перевищують сили внутрішніх зв'язків у породі [45]. Зусилля в породі, за вказаних умов, формуються внаслідок дії твердих інструментів, струменів рідини, створюваних хвиль та полів різної природи. При цьому, подальший розвиток та удосконалення, в основному, отримують породоруйнівні інструменти, за збереження загальних підходів до сутності самих способів буріння, що їх використовують. Така спрямованість робіт дозволила добитися значних успіхів у: підвищенні термінів ефективної працездатності інструменту, раціоналізації схеми відпрацювання відповідного озброєння, досягненні оптимальних показників механічної швидкості буріння, деякому обґрунтованому спрощенні конструктивного оформлення породоруйнівного інструменту і режимних параметрів відпрацювання останнього [2].

Проте, проблематика означених питань, особливо яскраво проявляється у складності, а іноді і неможливості, отримання комплексної ефективності процесу руйнування ГП середньої твердості і, особливо, твердих і міцних [46]. Відому складність, для формування стовбура свердловини, представляють масиви ГП, які характеризуються досить частою зміною показників твердості.

Відмітною ознакою більшості промислових способів буріння свердловин є фізичний прояв створюваних у масиві порід деформацій (зім'яття, сколювання, різання, подрібнення та ін.) [47], які у кінцевому рахунку призводять до його руйнування. Однак названими прикладами зовсім не обмежуються можливі варіанти методів просування вибою свердловини у гірському масиві. Теоретично розроблені і, у тому або іншому ступені, практично застосовуються такі способи руйнування (у переважній більшості випадків фізичного спрямування), що базуються на використанні внутрішніх сил й зв'язків, притягуваних у процес під впливом температурних, електромагнітних і інших полів, сюди включаються й ті, які призводять до докорінних змін стану масиву (наприклад зміна агрегатного стану). Разом з тим, загальною ознакою перелічених способів є те, що вони хоча в деяких випадках і володіють достатньо високими показниками ефективності, складні в реалізації та різко обмежені властивостями порід; остання обставина зовсім нехарактерна для способів механічного руйнування масиву. Втім, така постановка питання, у жодному разі не може слугувати підставою для виключення, передусім, фізичних способів з арсеналу прийомів формування стовбуру свердловини через те, що значною кількістю теоретичних досліджень і практикою бурових робіт обґрунтовано показано наступне: особливо високих показників процесу руйнування (головним чином для порід твердого

комплексу), можна досягнути за рахунок комбінації різних видів деформацій й способів їх створення. У світлі викладеного, не потребує жодного доказу наступне положення: дослідно-конструкторські роботи зі створення, або модернізації, апарату інструментально-технологічного забезпечення бурових робіт, обов'язково повинні базуватися на вичерпних даних щодо змісту й наповнення окремих етапів процесу розвитку руйнівних деформацій в гірському масиві та їх функціональній підпорядкованості визначальним чинникам різноманітної природи. Саме такий підхід є, практично, єдино можливим шляхом створення підґрунтя для якісно нових інтерпретацій елементарного акту руйнування гірської породи відповідно до можливостей вибійних технічних засобів й інструменту за раціональних варіацій режимних параметрів.

Вдаючись до аналізу факторів руйнівних процесів на вибої бурової свердловини, можна прослідкувати їх доволі сувору підлеглість витокам походження джерела відповідних деформацій в гірському масиві, результатом формальної трансформації яких повинно стати порушення суцільності останнього.

Виклик руйнівних напружень може бути здійснений на підставі ініціювання дії зовнішніх, а також внутрішніх, сил, як результату, зокрема, занурення в гірську породу спеціальних інденторів, впливу швидкісного напору струменів рідини, формування певних поверхневих градієнтів температури, створення високочастотних електричних полів тощо.

Специфікою раціональної організації бурових робіт є проєктування та здійснення таких структурно-впорядкованих технологічних операцій, які дозволяють отримувати свердловини в найкоротші терміни з мінімальними витратами. Втім, для адекватного виконання зазначеного положення, необхідна витримка цілого ряду передумов, зокрема найголовнішої – досягнення швидкістю руйнування гірської породи на вибої свердловини своїх максимально можливих значень [48]. Кількісним показником технологічної якості операції просування вибою свердловини в породних формаціях є механічна швидкість буріння (м/год.)

$$u = \frac{h}{t_{\sigma}}, \quad (1.6)$$

де h – довжина отриманого інтервалу свердловини, в осьовому напрямку, за час чистого буріння; t_{σ} – час корисної роботи вибійного ПРІ.

Параметр u повністю відображає ефективність даного способу буріння, руйнівного інструменту, режимних показників, застосовуваного технічного супроводження тощо. У той же час u не може виступати тотожним критерієм сумарного часу спорудження свердловини, оскільки останній, в загальному випадку, включає в себе також час на виконання спуско-підіймальних й інших допоміжних операцій, виконуваних за рейс. За стандартних умов тривалість рейсу визначає ресурс вибійного інструмента, руйнівні властивості якого знижуються в часі внаслідок зносу та як результат зазначеного, з'являється необхідність його заміни. Таким чином, загалом час спорудження свердловини характеризується сумою дискретних значень рейсової швидкості буріння (м/год.)

$$u_p = \frac{h_p}{t_{\sigma} + t_{cn} + t_{do}}, \quad (1.7)$$

де h_p – довжина отриманого інтервалу свердловини, в осьовому напрямку, за один рейс; t_{cn} – час, що витрачено на виконання спуско-підймальних операцій із бурильною колоною; t_{do} – час, який витрачено на виконання допоміжних операцій в рейсі (наприклад: підготовка до спуску бурового снаряду).

Всі тверді тіла, в тому числі і метали, з яких зроблений буровий ПРІ, неоднорідні за властивостями показника міцності [32]. Поверхня металу має складний геометричний мікрорельєф. У результаті тертя і зносу ПРІ втрачає частину будь-якого найслабшого елемента, що перетворюється на порошок, і виходить з ладу. Поступове руйнування поверхневого шару твердих тіл відбувається внаслідок повільного докритичного зростання тріщин вздовж деяких умовних граней кубиків, з яких складається поверхневий шар, доти, поки тріщини не досягнуть критичного розміру, після чого відбувається відділення цілих кубиків і всього шару. Далі процес багатократно повторюється.

Назвемо, до прикладу, основні причини докритичного зростання тріщин у металах при порівняно низьких навантаженнях: нестаціонарність зовнішніх навантажень (особливо періодичність або циклічність навантаження), що, в свою чергу, призводить до деякого зростання тріщин в результаті локальних пластичних деформацій у вершині тріщини (втомні тріщини); наявність водню у зовнішньому середовищі (особливо електростатичного водню у водних розчинах солей, кислот та лугів); наявність вологи (води або водяної пари) у зовнішньому середовищі з корозійно-активними речовинами, яка призводить до зростання тріщини внаслідок різних електрохімічних процесів локального анодного розчинення в її вершині (корозійне розтріскування металів). Названі причини комплексно присутні при роботі ПРІ на вибої свердловини. При цьому в процесі руйнування тріщини внаслідок зміни коефіцієнта інтенсивності напружки, можливий перехід від одного механізму до іншого. Якщо має місце послідовний вплив окремих механізмів, результуюча швидкість зростання тріщини може бути визначена як сума від складу прирощень тріщин.

З різноманіття праць, присвячених вивченню взаємодії пари «буровий інструмент - ГП», особливу увагу привертають до себе ті, в яких дане явище розглядається з позицій наукової дисципліни триботехніка (наука про тертя в машинах і механізмах; предмет триботехніки полягає в дослідженні контактної взаємодії твердих тіл, в результаті якої виникають сили тертя). Сили тертя, за вказаних умов, не тільки поглинають енергію, але і змінюють розміри контактуючих тіл. В основі молекулярно-механічної теорії сухого і граничного тертя та зносу лежить облік двоїстої природи процесу тертя, що обумовлена як подоланням сил молекулярної взаємодії між поверхнями, так і подоланням механічного опору, пов'язаного з формозміною поверхневого шару. Перший вид тертя протікає в зоні контакту двох тіл та обумовлений зміною форми тільки поверхневого шару і подоланням молекулярних, а також атомарних зав'язків, що виникають у точках реального контакту. Другий захоплює весь об'єм і обумовлений його формозміною. Іншим важливим положенням триботехніки є облік

дискретності контакту двох твердих тіл, обумовлений шорсткістю, лінійною різновисотністю і хвилястістю поверхні контакту, які мають місце на будь-яких твердих поверхнях. Залежно від умов контактування, можливий один із наступних видів взаємодії: пружний; пружно-пластичний; крихкий та в'язкий тип руйнування. Невід'ємною частиною теорії триботехніки є встановлення критичних точок, що характеризують зміну властивостей фрикційного контакту та визначають зносостійкість двох взаємоконтактуючих тіл [49].

У процесі тертя можна виділити дві головні функції процесу змащування: здатність створювати міцні плівки на поверхні тертьових матеріалів, із задовільним утриманням мастила на краях тріщин в результаті адсорбції молекул, та спроможність взаємодіяти з поверхневими шарами тертьових пар, з одночасною зміною їх структури і властивостей. Ці функції мастила істотно впливають на коефіцієнт тертя, знос і граничне значення тиску і швидкості ковзання, при яких відбувається перехід до неприпустимих процесів підвищення вібрації і руйнування бурового інструменту (БІ). Змащувальну дію пояснюють утворенням полярними групами на поверхні твердого тіла орієнтованих шарів.

Наблизити процес тертя до ідеального можна за допомогою мастила. У зв'язку з цим до мастильних матеріалів пред'являють такі вимоги. По-перше, вони повинні забезпечити легке ковзання одного шару відносно іншого, а по-друге, мастило не повинно витікати із зазору. У першому випадку необхідна низька в'язкість мастила, тобто, когезія має бути мінімальною, а адгезія – максимальною. У цьому плані мастила, або відповідні ПАР [50], повинні задовольняти обом вимогам, оскільки полярна група активно адсорбується та лежить на поверхні розділу, а когезія аліфатичних радикалів слабка. Умовою оптимальної роботи ПАР, як компонента мастила, буде перевищення роботи адгезії над силою зсуву на одиницю поверхні, що зумовлює десорбцію захисного шару. Застосування ПАР як мастила не є специфічною властивістю саме цих речовин. Для жирних масел, які відносять до ПАР, це швидше збіг властивостей, і поверхнева активність жирів не є мірою їх мастильної дії щодо величини сили тертя. Позитивний вплив високої поверхневої активності жирів позначається з їхньої здатності утворювати міцні плівки, які знижують величину поверхневої енергії системи «масло - тверде тіло».

Аналіз результатів теоретичних та експериментальних досліджень поведінки ГП та БІ при механічному навантаженні показав, що ПР в багатьох випадках контролюють, відповідно, їх міцність і термін служби. Для пояснення впливу різних середовищ на зменшення міцності твердих тіл у більшості випадків доцільно використовувати критерій руйнування Гриффітса [32]:

$$\sigma = \sqrt{\frac{2\alpha E}{\pi l(1-\mu^2)}}, \quad (1.8)$$

де α – питома вільна поверхнева енергія; E – значення модулю Юнга; μ – коефіцієнт Пуассона; l – довжина мікротріщини.

Механізм впливу рідин можна уявити у наступному вигляді. При руйнуванні крихкого тіла на поверхні і у внутрішніх його частинах з'являються мікротріщини, що поступово зростають. Якщо руйнування відбувається у вакуумі,

то краї мікротріщин можуть знову стулятися при видаленні руйнівної сили, і тіло відновлюється, за умови, звичайно, що не відбулося повного поділу на частини. Тепер припустимо, що руйнування крихкого тіла відбувається в будь-якій рідині, яка зовсім не змочує його поверхню і в складі якої немає ПАР [51]. При утворенні тріщин рідина по капілярах не може увійти до тріщин, і руйнування тіла відбувається, ніби воно знаходиться у вакуумі. Поверхнева енергія тіла залишається такою, як у вакуумі. Тріщина заповнюється парами рідини, що осідають на її стінках у вигляді мікроскопічних крапельок, які при знятті руйнівної сили витісняються, і цілісність тіла може відновитися.

Дослідження показали, що зона передруйнування утворюється не тільки при процесах механічного руйнування твердого тіла, тобто при утворенні в ньому нових поверхонь, але і при будь-якому його деформуванні як в області пружних, так і пластичних деформацій. Чим вище напруга та тим ближче вона до межі міцності, тим більше розвинена зона передруйнування. Характерно, що в області пружних деформацій зона передруйнування поступово зникає, умовно вона «заліковується» під впливом молекулярних сил після зняття зовнішніх зусиль. В області пластичних деформацій ця зона також може поступово «заліковуватися», але при руйнуванні твердого тіла зона передруйнування розвивається незворотно, що має місце при застосуванні ПАР [32].

Визначення підходів до вдосконалення процесів руйнування гірських порід передбачає системний аналіз фізичних, технічних і технологічних факторів, що впливають на ефективність буріння, а також пошук шляхів підвищення продуктивності, надійності та енергоефективності бурового процесу.

До основних напрямів удосконалення можна віднести: раціоналізацію енергетичних параметрів руйнування – підбір раціональних значень осьового навантаження, частоти обертання бурового інструмента та витрати промивальної рідини для мінімізації втрат енергії й зносу інструменту; удосконалення конструкцій бурових доліт і породоруйнівних елементів – застосування нових матеріалів (твердих сплавів, надтвердих композитів, полікристалічних алмазів), геометричних форм різців та систем охолодження для збільшення ресурсу роботи; використання фізичних та комбінованих методів руйнування – поєднання механічного впливу з термічними, електричними, гідравлічними або ультразвуковими способами для підвищення швидкості проникнення в породу; підвищення ефективності відведення продуктів руйнування (шламу) – удосконалення циркуляційних систем, характеристик промивальних рідин і схем очищення вибою; автоматизацію процесу буріння – впровадження систем моніторингу, адаптивного керування режимами буріння й прогнозування стану інструменту на основі сенсорних даних; комплексний підхід до взаємодії «інструмент - порода - промивальне середовище», що передбачає узгодження фізико-механічних властивостей порід із технологічними параметрами буріння для досягнення максимальної ефективності процесу поглиблення свердловини.

Таким чином, вдосконалення процесів руйнування гірських порід спрямоване на зменшення енерговитрат, підвищення швидкості проходки, зниження аварійності та забезпечення стабільної роботи бурового обладнання [52].

Як відомо, процеси буріння свердловин без прояву ускладнень та якості їхнього цементування залежать від правильного вирішення питань, пов'язаних з промиванням вказаного типу гірських виробок [53]. В даний час без досконало організованого процесу промивання вибою та стовбура свердловини неможливий подальший розвиток глибокого та надглибокого буріння. Однак вирішення питань удосконалення технологічних процесів промивання свердловин досить складно, що пояснюється наявністю великої кількості робіт на цю тему та існуванням у висновках авторів значних розбіжностей.

У цілому потік промивальної рідини (ПР) має бути таким, щоб забезпечувати повноцінне виконання всіх основних функцій бурового процесу, які визначають його ефективність, безпеку та стабільність. Зміст цих функцій узагальнюється у системі ключових факторів, що впливають на гідродинамічний режим, очищення вибою, стабільність стовбура свердловини та збереження працездатності бурового інструменту. Саме ці фактори, наведені в табл. 1.2, відображають взаємозв'язок між параметрами потоку ПР, фізико-хімічними властивостями рідини та геолого-технічними умовами буріння [54].

Таблиця 1.2

Робочі та обмежувальні вимоги до бурових ПР

Узагальнені функції	Технологічні обмеження
Руйнувати вибій Очищати вибій від шламу і транспортувати шлам на денну поверхню Компенсувати надлишковий пластовий тиск флюїдів Охолоджувати ПРІ Попереджати обвали стінок свердловини Зважувати компоненти ПР і шлам Скидати шлам у відвал Змащувати і охолоджувати долото, бурильний інструмент і устаткування Забезпечувати ефективну роботу вибійних машин або механізмів: турбобурів, гідро- та пневмоударників, ежекторних снарядів тощо	Не руйнувати долото, бурильний інструмент і устаткування Не розмивати стовбур свердловини Не призводити до поглинань ПР і не піддавати гідророзриву пласти Не погіршувати проникність продуктивних горизонтів Не призводити до високих втрат гідравлічної енергії Не скидати у відвал компоненти ПР Не викликати осипів і обвалів стінок свердловини Не викликати явища розмиву і руйнування керна, посилення його самозаклинювання

Визначення раціональної витрати ОА в більшості випадків полягає у виявленні меж мінімальної та максимальної витрат при подачі агента, за межами яких відбувається погіршення показників процесів буріння. Між мінімальним і максимальним значеннями витрат існує зона, всередині якої приймається конкретне значення кількості ОА, що подається в свердловину в залежності від конкретних умов буріння вказаної гірської виробки.

Визначення підходів до вдосконалення процесів очищення свердловин під час буріння полягає у встановленні технічних, технологічних та гідродинамічних рішень, що забезпечують ефективне видалення шламу з вибою та підтримання стійкості стовбура свердловини [55]. Напрями вдосконалення включають: раціоналізацію параметрів циркуляції промивальної рідини (ПР) – підбір

раціональної витрати, швидкості потоку, густини та в'язкості ПР для забезпечення ефективного виносу частинок шламу без ерозії стінок свердловини; удосконалення складу і властивостей очисних агентів – застосування полімерних, глинистих, емульсійних і комбінованих систем із контрольованими реологічними характеристиками, що покращують стабільність потоку й зменшують відкладання твердих частинок; покращення конструкції циркуляційних систем і елементів очисного обладнання – впровадження ефективних гідравлічних схем, багатоступеневих шламових сепараторів, центрифуг і гідроциклонів для повного очищення ПР перед її повторним використанням; розроблення методів активного контролю процесу очищення – моніторинг параметрів циркуляції (швидкість потоку, тиск, концентрація твердих частинок) у реальному часі з використанням сенсорних систем і цифрових технологій керування; урахування геолого-технічних умов буріння – адаптація режимів очищення до типу порід, кута нахилу свердловини, глибини, температурного режиму та ступеня насичення флюїдами; запобігання осіданню шламу у стовбурі свердловини – удосконалення профілю потоку, використання турбулізаторів, стабілізаторів і спеціальних добавок, що сприяють підтриманню частинок у завислому стані. Загалом, удосконалення процесів очищення свердловин спрямоване на збільшення ефективності видалення вибуреної породи, зменшення аварійності, підвищення стабільності циркуляційної системи та продовження ресурсу бурового обладнання [56], що в комплексі забезпечує підвищення загальної продуктивності буріння.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1

У результаті проведеного аналізу встановлено, що процеси руйнування гірських порід та очищення свердловин є ключовими складовими бурової технології, від ефективності яких залежить продуктивність, якість і безпечність спорудження свердловин різного призначення.

1. Визначено, що спорудження свердловин – складний багатофакторний процес, який охоплює механічні, гідродинамічні та фізико-хімічні явища, взаємопов'язані між собою та зумовлені геолого-технічними умовами буріння.

2. Проаналізовано основні способи руйнування гірського масиву, серед яких провідне місце займають механічні, фізичні та комплексні методи; їх вибір залежить від фізико-механічних властивостей порід, глибини та призначення свердловини, а також можливостей бурового обладнання.

3. Розглянуто циркуляційні процеси, що визначають рух і властивості промивальних рідин, які забезпечують очищення вибою, охолодження інструменту, стабілізацію стінок свердловини та видалення шламу.

4. Сформульовано підходи до вдосконалення процесів руйнування порід і очищення свердловин, які включають: підвищення енергоефективності буріння, удосконалення конструкцій інструментів, покращення складу промивальних рідин, застосування автоматизованих систем контролю режимів буріння; раціональна організація цих процесів дозволяє підвищити швидкість проходки, зменшити енерговитрати, продовжити ресурс обладнання та інструменту.

РОЗДІЛ 2. ВИЗНАЧЕННЯ ПЕРЕДУМОВ ПІДВИЩЕННЯ МЕХАНІЧНОЇ ШВИДКОСТІ БУРІННЯ ЯК ОСНОВИ РОЗРОБКИ ПРОГРЕСИВНИХ СПОСОБІВ РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКОГО МАСИВУ

2.1 Питання фізики процесів руйнування гірських порід

Питання фізики процесів руйнування гірських порід при бурінні свердловин охоплюють вивчення закономірностей взаємодії бурового інструмента з гірським масивом і механізмів перетворення механічної, теплової та гідравлічної енергії у процесі руйнування порід [49].

Руйнування ГП відбувається внаслідок передачі енергії від бурового інструмента до гірського масиву, що призводить до деформації, тріщиноутворення та відділення частинок породи. Залежно від типу впливу розрізняють механічне, термічне, гідравлічне, електричне та комбіноване руйнування [57].

У традиційному бурінні енергія передається через удар, зсув або стиск, створюючи локальні напруження, що перевищують межу міцності породи. Механічне руйнування визначається величиною осевого навантаження, частотою обертання долота, швидкістю подачі та характеристиками інструменту [12].

Енергія, яка подається на вибій, витрачається на руйнування породи, тертя між інструментом і вибоєм, переміщення шламу та теплові втрати. Визначення енергоефективності процесу дозволяє оптимізувати режими буріння та підвищити швидкість проходки.

Характер руйнування залежить від міцності, пластичності, тріщинуватості, вологості та твердості порід. Тверді й крихкі породи руйнуються шляхом ударного ламання, тоді як пластичні – деформаційним зрізом або стиском.

Під час буріння промивальна рідина не лише видаляє шлам, а й зменшує тертя, охолоджує долото і впливає на структурний стан породи, змінюючи її механічні властивості (зволоження, розм'якшення, розчинення цементуючих речовин) [24].

Для дослідження закономірностей руйнування застосовують моделі напружено-деформованого стану, методи механіки суцільного середовища і теорії тріщиноутворення, що дозволяє прогнозувати характер відділення частинок і втрати енергії [58].

До сучасних тенденцій належать використання ультразвукових, лазерних, електрогідравлічних і термохімічних методів впливу, які зменшують навантаження на інструмент і підвищують ефективність руйнування.

Фізика процесів руйнування гірських порід – це основа наукового обґрунтування технологій буріння [59]. Глибоке розуміння цих закономірностей дозволяє підбирати оптимальні режими роботи, зменшувати енерговитрати, підвищувати продуктивність і забезпечувати стабільність бурового процесу у різних геолого-технічних умовах.

Процес поглиблення свердловини, що підрозділяється на окремі рейси, включає в себе значний обсяг робіт не пов'язаний безпосередньо з механічним руйнуванням вибою. При спорудженні свердловин й особливо в породах твер-

дих, виникає необхідність порівняно частого підйому бурильної колони, в тому числі для заміни зношеного інструменту, який знаходиться на її нижньому кінці [20]. Вказаний фактор послужив поштовхом до розробки пристроїв й технологій, які дозволяють збільшити тривалість рейсу за рахунок: застосування знімного ПРІ (він транспортується всередині бурильної колони без її витягання на поверхню); використання в якості механічних інструментів – твердих куль (дробу), що засипають у свердловину через гирло або транспортують на забій потоком рідини. Реалізація принципів останнього методу на практиці дозволила з'ясувати його основні переваги та суттєві вади [23]. Разом з тим, аналіз літературних й виробничих даних, а також лабораторно-теоретичні дослідження показали існування значного потенціалу у методу, нині практично забутого в практиці бурових робіт, а саме гідромеханічного.

Відповідно до сформульованого завдання, базовим принципом пропонованої технології є спосіб кулеструминного буріння (pellet impact drill), уперше застосований для спорудження свердловин дослідниками з США [60]. Однак розроблені пристрої, для реалізації зазначеного ефективного способу буріння, під час експлуатації виявили свою обмеженість у застосуванні та суттєву недосконалість. Остання обставина і стала поштовхом до пошуку нових досконалих конструкцій пристроїв гідромеханічного буріння. Найбільш повно вибійним факторам спорудження свердловин відповідає пристрій (рис. 2.1), спроектований на кафедрі нафтогазової інженерії та буріння (НГІБ) Національного технічного університету (НТУ) «Дніпровська політехніка» [61], який працює так: при виникненні циркуляції рідини у внутрішній частині корпусу 1 пристрою починається рух породоруйнівних куль 3, які руйнують вибій. В привибійній зоні потік рідини розділяється на дві складових, одна з яких разом із кулями піднімається вверх до струминного апарату 2, а інша, збагачена шламом, виходить в затрубний простір між торцем і корпусом породоруйнівного кільця 4 та вибоєм і стінками свердловини відповідно; шлам видаляється через спеціальні промивні вікна 8. Наявність кільця 4 необхідна для формування прямокутного профілю вибою свердловини за рахунок руйнування його криволінійних стінок, виникнення яких обумовлено технологічною схемою буріння та призводить до зменшення механічної швидкості буріння або до повної зупинки процесу поглиблення. Кулі 3 потоком рідини розміщуються і утримуються у посадкових гніздах 5, які містить в нижній частині кільце 4.

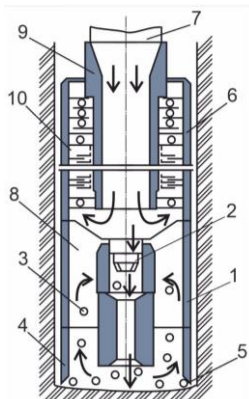


Рис. 2.1. Пристрій кулеструминного буріння

Постійне обертання кільця 4 обумовлено наявністю у верхній частині корпусу турбінного апарата, привод якого здійснюється рідиною – її потік при виході з валу 9 розділяється на два: один направляється до струминного апарату, а інший, обертаючись на 180^0 іде до турбіни, а потім через отвори 10 в простір між стінками свердловини і корпусом приладу.

Іншим можливим варіантом застосування способу руйнування породи твердими шарами стало удосконалення пристрою дробового буріння (рис. 2.2) [62], який дозволяє, на відміну від попереднього, споруджувати свердловини з відбором керну.

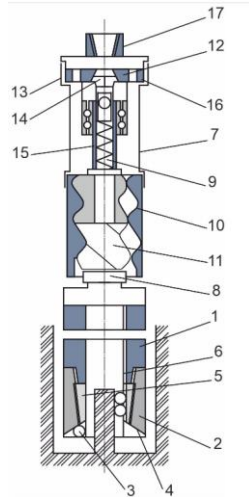


Рис. 2.2. Пристрій дробового буріння

Означений пристрій працює у такий спосіб: при виникненні циркуляції рідини, починається обертальний рух гвинтового двигуна 7, крутний момент якого, через перехідник 8 та відповідно корпус керноприймача 1 і породоруйнівне кільце 2, передається дробинкам 3, які взаємодіють з породою забою і руйнують її. Крізні гнізда 4 змінної висоти, яка зменшується в напрямку від вісі до периферії кільця 2, необхідні для розміщення і стійкого утримання дробинок 3 та надійної передачі на них обертального моменту. При бурінні відбувається зношення дробинок 3 та, як наслідок, їх поступове видалення з гнізд 4. Замість зношених дробинок на їх місце з вертикальних колекторних пазів 6 поступають більш крупні та працездатні. Цей механізм подавання нових дробинок та видалення зношених виключає можливість скупчення дробу в зовнішньому просторі свердловини та невиправдане її розроблення. Дробинки 3, після спуску пристрою, вводяться на поверхні у потік промивальної рідини, при цьому вони вільно проходять бурильну колону та через ніпель 17, фланець 12, гнучкий вал 9 (з цанговим клапаном 14) і полий ротор 11, поступають до внутрішньої порожнини керноприймача 1, де послідовно розміщуються в пазах 6. При постановці пристрою на вибій, шліцьові роз'їми 13 змикаються, фланець 12 рухається униз та перекриває цанговий клапан 14, це спричинює зміну шляху руху промивної рідини, яка тепер може проходити тільки через циркуляційні канали 16, що призводить до включення в робочий режим гвинтового двигуна 7. Пружина 15, що розміщена у внутрішній порожнечі гнучкого полого валу 9, необхідна для

надійної фіксації цангового клапану 14 при його перекритті. Високі частоти обертання кільця 2 із дробинками 3 та його багатоконтактність із вибоєм сприяють встановленню якнайефективніших умов руйнування порід, необхідних саме для дробового буріння. За рахунок цього значно змінюється хід та направленість елементарного акту руйнування порід і відповідно зростає механічна швидкість буріння. Зрив та утримання керну в корпусі керноприймача здійснюється за рахунок припинення обертання двигуна 7 та лівого обертання самої бурильної колони разом із пристроєм. При цьому в результаті значного тертя між колонкою керну та розміщеними в колекторних пазах дробинками 3 розрізний кільцевий керновідривач 5 викручується на різьбленні униз з одночасним зімкненням його в місці розрізу та відповідним зменшенням внутрішнього діаметру. Це призводить до його зімкнення та щільного обтиску керну через дробинки 3. Для зриву достатньо декількох оборотів бурильної колони, що викликає виникнення високих напружень в керні та його сколювання.

Не потребує будь-якого доказу загальновідома обставина: основним стримуючим чинником широкого промислового використання багатьох інноваційних способів і прийомів буріння, є складність виготовлення й технологічного супроводження їх окремих, зокрема, конструктивних складових, які також вимагають, досить часто, докорінної перебудови всього базового процесу спорудження свердловин, що не завжди можливо і економічно обґрунтовано за умов існуючого мінімального рівня фінансування геолого-видобувної галузі. Саме означений фактор був покладений, в якості одного з найвпливовіших, в основу розробки напрямку модернізації гідромеханічного способу буріння [63].

Значні коливання у діаметрах та постійна зміна вибійних умов, обумовлені поступовим зануренням свердловини у гірський масив, в основному негативно відбиваються на всіх відповідних процесах. Особливо значного впливу, за таких чинників, зазнають обставини реалізації проектних режимних параметрів відпрацювання породоруйнівного інструменту.

Ефективність роботи вибійного інструменту, багато в чому, залежить від додержання раціональних норм осьового навантаження для нього [64]. Однак зростання глибин надзвичайно нівелює можливості передавання інструменту потрібного осьового зусилля, через існування значної площі контакту бурильної колони – джерела останнього, із стінками свердловини, обумовленого конструктивним компонуванням самої бурильної колони, властивостями оточуючих гірських порід, режимом роботи бурильної колони у свердловині, природним або штучним викривленням стовбура останньої [65].

Важливим є і те, що виготовлення ПРІ пов'язане із витратою дефіцитних й високовартісних матеріалів, застосування яких не завжди позитивно відповідає кінцевим результатам буріння, як технологічної операції [66]. Крім того, конструювання колонкового інструменту значних діаметрів технічно не освоєно (і навіть не виправдано), що висуває додаткові обмеження до геолого-технологічних умов спорудження відповідних свердловин.

Такому, у деяких пунктах надскладному, завданню відповідності обмежуючим й фундаментальним ознакам напряму інноваційного розвитку способів

спорудження свердловин, у найбільшому ступені, відповідає технологія буріння, реалізована за допомогою породоруйнівних куль [67].

Запропоновані фахівцями кафедри НГІБ НТУ «Дніпровська політехніка» конструкції пристроїв, поєднуючи в собі найбільш позитивні характеристики, дозволяють, у цілому, уникнути або звести до мінімуму існуючі недоліки у відношенні до механізму руйнування гірських порід на вибої свердловини. Саме раціоналізація цього процесу з чітким обґрунтуванням усіх його факторів, дозволить суттєво підвищити показники результативності способів, що можуть стати прогресивною альтернативою тим низько продуктивним й затратним технологіям, які застосовують нині.

Ефективність руйнування гірських порід при використанні розглянутих бурових пристроїв, об'єднати які можна в групу гідромеханічних, буде визначатися: властивостями матеріалів, підданих руйнуванню (в цілому об'єктивного показника); конструктивними особливостями породоруйнівного інструменту (кулі або дріб, а також спеціальні кільця для утримання останніх, з притаманними їм необхідними геометричними й механічними характеристиками); факторами режиму буріння (значення руйнуючого зусилля, напрямок та швидкість його дії).

Принципово новою конструктивною особливістю, яка кардинально змінює хід протікання забійних процесів кулеструминного буріння, є введення механічного породоруйнівного органа, покликаного виключити істотні недоліки схем реалізації буріння свердловин із використанням куль [68]. Оскільки породоруйнівне кільце є ключовим органом пристроїв, усі його конструктивні елементи та механізм їх взаємодії із кулями й породним масивом, а також технологічні режими буріння повинні бути детально обґрунтовані й ув'язані зі значною гамою властивостей контактуючих матеріалів.

Виникнення значного числа способів буріння й типів породоруйнівного інструменту було обумовлене, насамперед, наявністю у гірських порід комплексу взаємопов'язаних властивостей, які визначають їх фізико-механічні характеристики. У випадку безпосередньої інструментальної дії на породний масив такими базовими характеристиками є міцність й твердість. Тут важливо зазначити, що за використання в якості породоруйнівних елементів сплавів металів і різних природніх або синтетичних матеріалів, конструктивне оформлення та технологічний режим роботи останніх дозволяє своїм органічним раціональним взаємозв'язком проводити руйнування масиву порід, з тими або іншими техніко-економічними показниками, які корелюються з різноманітним проявом властивостей гірських порід.

Показовою якісною та кількісною мірою ефективності способу руйнування може бути прийнятий масштаб руйнування та його енергоємність, можливість оцінки останнього полягає у визначенні об'єму зруйнованої породи або вимірюванні глибини занурення інструменту в породу. Причому, цілком зрозуміло, що занурення не є власне метою, завдання стосується необхідності відділення від масиву можливо більшого елемента на протязі акту впливу.

У відповідності до зазначеного, прийнято виділяти поверхневу, втомну й об'ємну форми руйнування порід. Найбільш ефективний об'ємний вид руйнування, характеризується значною областю розповсюдження в масиві порід деформацій, які призводять до утворення лунки.

Аналіз виробничих й лабораторних даних дозволяє стверджувати, що багато в чому, в відношенні прояву форм руйнування, процес поглиблення свердловини визначається вмілим урахуванням фізико-механічних особливостей поведінки породного масиву.

Гідромеханічний (кулеструминний) спосіб буріння, на відміну від багатьох інших, характеризується, передусім, несумірне великими швидкостями прикладення (за допомогою куль) навантажень до гірської породи вибою, що досягають 60 м/с і більше; за схемою реалізації механізму руйнування він, із певними припущеннями, може бути зіставлений з шарошковим [69], у тому випадку, коли долота працюють за принципом дробляче-сколюючої дії на вибій (що різнить долота з позицій наявності значної динамічності прикладення навантаження), яка, як відомо, є доволі ефективною в плані створення передумов виникнення об'ємної форми руйнування гірських порід (надзвичайно важливої для порід твердого комплексу).

Швидкість поглиблення свердловини u , що може бути оцінена за формулою (2.1), є тим об'єктивним показником процесу буріння, який дозволяє судити про ступінь раціональності використання потужності силового приводу бурової установки, у тому числі, й її вибівної складової [57].

$$u = \frac{1}{A_v} \cdot \frac{N}{F}, \quad (2.1)$$

де: A_v – енергоємність процесу руйнування гірської породи; N – величина потужності, що підводиться до вибою свердловини; F – площа вибою свердловини.

У свою чергу, енергоємність процесу руйнування визначається за наступною формулою:

$$A_v = \frac{W}{V}, \quad (2.2)$$

де: W – величина енергії, що витрачається на руйнування породи, в даному випадку енергія удару кулі; V – об'єм зруйнованої породи.

Значення величини енергії удару кулі, в загальному випадку, можна визначити у такий спосіб:

$$W = \frac{mv^2}{2}, \quad (2.3)$$

де: m – маса кулі, що наносить удар по вибою; v – швидкість кулі.

Аналіз формул (2.1) - (2.3) дозволяє зробити такі висновки: швидкість поглиблення свердловини прямо пропорційна забійній потужності та зворотно пропорційна енергоємності руйнування й площі вибою; кулеструминний спосіб характеризується значними величинами енергії ударів та їх частотності. Саме тут необхідно зазначити: існуючі методики визначення показників процесу

руйнування базуються на використанні даних, отриманих в результаті статичного (вельми повільного) занурення інденторів, що у будь-якому випадку не може адекватно відображати сутність механізму руйнування при значній динамічності прикладення навантаження.

2.2 Дослідження процесу руйнування гірських порід на вибої при бурінні свердловин

У процесі дослідження новітніх методів інтенсифікації буріння важливе значення має аналіз фізичних механізмів взаємодії робочих елементів бурового інструмента з гірською породою. Одним із перспективних напрямів є використання кулеструминних снарядів, що поєднують дії механічного удару та гідродинамічного тиску. Саме тому, для розуміння ефективності такого методу, необхідно розглянути закономірності руйнування гірських порід при роботі кільця проєктованого кулеструминного снаряда, зокрема з урахуванням ефекту механічного впливу куль на поверхню вибою. Основні закономірності процесу руйнування ГП при роботі кільця проєктованого кулеструминного снаряда з ефектом механічного руйнування [70], можна встановити, вивчаючи елементарний акт механізму руйнування однією кулею.

При ударі окремої кулі об поверхню гірської породи виникає локальне напруження, яке перевищує границю міцності матеріалу. У результаті цього в зоні контакту формується осередок пластичної деформації, де енергія удару перетворюється на механічну роботу руйнування. Подальше поширення напружень у глибину породи призводить до утворення тріщин, відшаровування та відколювання мікрочастинок, що в сукупності формує зону руйнування вибою. При багаторазовому повторенні актів удару численними кулями відбувається накопичення дефектів у структурі породи, що сприяє її поступовому роздробленню й подрібненню.

Перша стадія процесу руйнування, що відбувається в межах пружних властивостей ГП, з достатнім ступенем точності описується теорією про розподіл зусиль і напруг при стисканні двох тіл (завдання Буссінеска і Герца про дію зосередженої сили на пружну площину і про стиснення двох контактуючих тіл по криволінійній поверхні відповідно).

Друга стадія руйнування ГП настає при навантаженні, що досягає тимчасового опору останньої дезінтеграції в зоні об'ємних напруг. Незначна відмінність межі пружності від тимчасового опору породи руйнуванню (для твердих ГП) дозволяє вважати, що стискання у зоні контакту настає при навантаженнях близьких до межі пружності кожної конкретної породи [71].

Величина необхідного навантаження для ГП, що викликає для неї зминання або руйнування, визначиться з наступної умови

$$p = \sigma_b \cdot F, \quad (2.4)$$

де σ_b – деяка величина розрахункової руйнівної напруги для ГП; F – площа зони дотику кулі з ГП в момент руйнування останньої.

В якості орієнтовного значення параметру σ_ϵ можуть бути без помітних похибок узяті величини твердості ГП σ_{60} , визначені за відомим методом Л.А. Шрейнера [32] з урахуванням коефіцієнту динамічності, тобто

$$\sigma_\epsilon = \frac{\sigma_{60}}{\beta}, \quad (2.5)$$

де β – поправочний коефіцієнт динамічності навантаження, що залежить від характеру реалізації останнього; для умов роботи породоруйнівного кільця з кулями, величина β може бути прийнята в межах 2.

Важливою обставиною тут є те, що значення величин твердості ГП були отримані при вдавлюванні циліндричного пуансона в зразок ГП, а, як відомо, характер і послідовність механізму деформації під пуансоном і сферою різні.

Площа взаємодії окремої кулі з ГП, у разі правильної округлої форми для неї, природно буде близька до площі кола, діаметр якого, у найбільш загальному випадку, визначається формулами Герца.

$$d = 1,1443 \sqrt{4Pr \left(\frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2} \right)}, \quad (2.6)$$

де P – навантаження на окрему породоруйнівну кулю; r – радіус кулі; μ_1 і μ_2 – коефіцієнт Пуассона для матеріалу кулі і ГП відповідно; E_1 і E_2 – модулі пружності матеріалу породоруйнівної кулі та ГП у масиві.

Наведена формула справедлива для визначення розміру зони контакту кулі з площиною, у той час як практично вибій свердловини має в тій чи іншій мірі так звану «хвилясту» форму. Однак ця обставина не є перешкодою для подібного трактування взаємодії в парі «породоруйнівна куля - ГП», що доведено рядом теоретичних та експериментальних досліджень, якими наочно проілюстровано: криволінійна поверхня тіла може бути прирівняна до площинної, при визначенні розмірів зони взаємодії, якщо радіус кривизни поверхні тіла в сім разів і більше перевищує радіус кулі. Численні виміри величини «кривизни» вибіної зони свердловини кулеструминного способу буріння доводять її належність до вказаного обмежувального діапазону.

Третя стадія руйнування ГП кулею, що характеризується відділенням конуса сколювання, настає тільки після утворення конусу зминання, при цьому знову підкреслимо, що сколювання ГП відбувається під дією дотичних зусиль, що виникають внаслідок розвитку на поверхні конуса відповідного тиску.

Приблизна розрахункова схема для визначення навантаження на кулю, що забезпечує сколювання ГП, може бути отримана при розгляді виділеного на поверхні конуса зминання елементарного кубика (рис. 2.3). Дві грані цього кубика паралельні поверхні конуса зім'яття. Перпендикулярно цим граням по вісі $n_1 - n_1$ діють нормальні стискаючі напруги σ_1 . По вісі кубика $n_2 - n_2$, перпендикулярній площині перерізу, діють стискаючі напруги σ_2 . По вісі розглядуваного кубика $n_3 - n_3$, паралельній поверхні конуса зминання, напруги дорівнюють нулю, оскільки поверхня ГП навколо майданчика контактування не навантажена, і переміщення в цьому напрямку лінії цілком можливе.

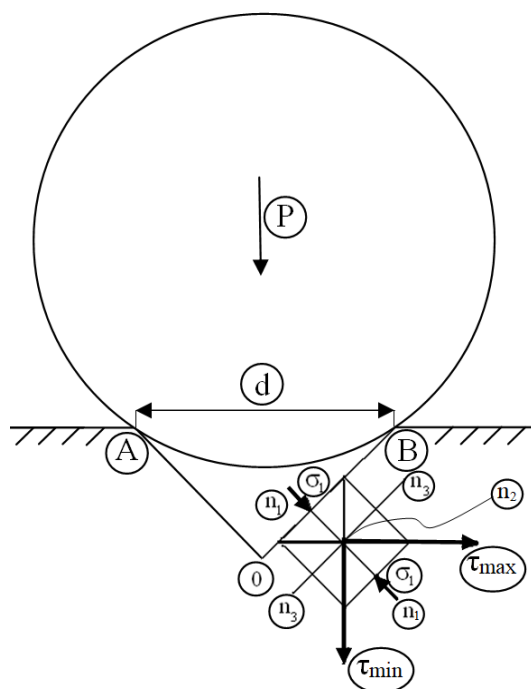


Рис. 2.3. Орієнтовна розрахункова схема для визначення навантаження на кулю, що забезпечує режим сколювання ГП

Виходячи з наведеної інформації, можна констатувати наступне: зону навколо конуса зминання для ГП цілком виправдано можна вважати такою, яка знаходиться в умовах плоского напруженого стану на глибину, що відповідає висоті конуса зминання. Дотичні напруги на гранях виділеного елементарного кубика відсутні, оскільки ковзання стиснутої ГП по поверхні конуса деформованої породи практично немає. Тому грані виділеного елементарного кубика можна вважати головними із відповідними трактовками [72].

Розглядаючи плоский переріз зони, що прилягає до площини взаємодії куль з ГП, нескладно побачити, що по виділеній вісі $n_1 - n_1$ діють нормальні стискаючі напруги σ_1 , і, як результат останніх – дотичні напруги τ , приблизну величину яких для будь-якого майданчика, направлено під деяким кутом θ до головних майданчиків, можна знайти за формулою

$$\tau = \frac{\sigma_1}{2} \sin 2\theta \quad (2.7)$$

Дані рис. 2.3 та основні закономірності теоретичної механіки і опору матеріалів дозволяють стверджувати наступне: найбільшими для розглядуваних умов будуть дотичні напруги під кутом 45° до поверхні конуса зминання у взаємно перпендикулярних напрямках; причому найбільша дотична напруга τ_{max} направлена до поверхні породного вибою, а τ_{min} уходить вглибину, що обумовлено напрямком σ_1 . Отже, сколювання ГП відбудеться в напрямку найбільшої дотичної напруги τ_{max} , при досягненні нею руйнівного значення.

Цілком очевидно, що за міру опору ГП щодо прояву дотичної напруги слід приймати опір сколюванню $\tau_{скол}$. Виходячи зі сказаного, можна записати формульну умову настання третьої стадії руйнування

$$\tau_{max} \geq \tau_{скол}, \quad (2.8)$$

інакше кажучи, сколювання інструментом породи відбудеться тоді, коли величина $\tau_{\text{скол}}$ перевищить опір ГП там, де він мінімальний.

Достатньо численні експериментальні дослідження характеру сколювання ГП навколо майданчика контактування та величина кутів нахилу твірних конусів зминання і сколювання до їх основи, цілком підтверджують сказане. Різні місцеві ослаблення ГП також призводять до часткових виколів. Деяке стиснення ГП безпосередньо кулею, що прилягає до точок А і В (рис. 2.3), веде до збільшення опору ГП сколюванню в даній області, та, крім цього, у вершині конуса зминання відбувається концентрація напруги. Це підтверджується тим, що вершина конуса сколювання наближається до вершини конуса зминання, причому площа зони сколювання природно збільшується. Величина навантаження для забезпечення механізму сколювання ГП, може бути знайдена зі співвідношення нормальних і дотичних напруг, які мають місце на поверхні конуса зминання; при цьому необхідно умовно прийняти, що напруги σ_1 рівні за абсолютною величиною питомому тиску в основі конуса зминання, тобто

$$\sigma_1 = \sigma_k = \frac{P_2}{F}, \quad (2.9)$$

де σ_1 і σ_k – величини нормальних тисків на поверхні конуса зминання і його основи в момент сколювання породи відповідно; P_2 – навантаження на кулі в момент сколювання ГП; F – величина площі основи конуса, що відповідає площі контакту кулі з породою в момент зминання останньої.

Переписавши розглянуте рівняння в іншому вигляді, ми можемо отримати вираз для визначення навантаження, що сколює

$$P_2 = \sigma_1 F = 2\tau_{\text{скол}} F. \quad (2.10)$$

Підсумовуючи вищевикладену інформацію, можна з упевненістю сказати, що, по-перше, вибір в якості органу формування периферійної зони породного вибою споруджуваної свердловини породоруйнівного кільця є виправданим як з точки зору механізму руйнування, так і ефективності роботи, і по-друге, сама технологічна схема роботи породоруйнівного кільця дозволяє в широкому діапазоні регулювати вихідні характеристики взаємодії в парі «куля - ГП».

Здійснюваний в гідромеханічному снаряді комбінованого так званого кулеструминно-абразивного буріння механізм обробки периферійної зони свердловини ґрунтується на відомому ефекті зношування (наприклад, руйнування і стирання берегів річок осколками порід, що захоплюються течією).

Адекватність запропонованого процесу умовам, які мають місце при кулеструминному бурінні, підтверджується наявністю великої кількості різнорідних уламків на вибої свердловини, що є результатом розколювання куль і відокремлення від масиву продуктів руйнування [73]. Спеціальна конструкція породоруйнівного органу дозволяє перенести абразивний вплив уламків з власне самого снаряда на вибій свердловини (його пристінну зону, чим досягається надання їй технологічно-необхідної прямокутної форми).

Механізм руйнування породи на вибої свердловини спеціальною матрицею, яка містить уламки куль та ГП, безумовно, буде комплексним, та включати в собі кілька елементарних видів зношування, а саме: абразивне зношування,

зношування внаслідок прояву пластичного деформування, зношування при крихкому руйнуванні, і нарешті, втомне зношування.

Абразивне зношування порід вибою свердловин здійснюється в результаті ріжучої або дряпаючої дії уламків куль або ГП; при цьому продукти руйнування поверхні, що зношується, видаляються або у вигляді дуже дрібних частинок, або фрагментів передзруйнованого матеріалу, видавленого попередньо по сторонах пластично деформованої подряпини, або у вигляді більш-менш дисперсних агрегатів, які крихко відокремилися при одно- або багаторазовому впливі.

Відповідно до механізму протікання вибійних процесів кулеструминного буріння, породоруйнівна матриця буде містити в собі уламки різної форми, довільним чином орієнтовані, які здійснюють зношування гранями або ребрами. Цілком очевидно, що ефективну роботу руйнування будуть здійснювати відносно тверді частинки, роль інших буде зведена до попередніх деформацій.

Зношування при крихкому руйнуванні практично можна здійснити у породах, які належать до пружно-крихкої групи (кварцити, джеспіліти, роговики та ін. подібні), які характеризуються виключно пружними деформаціями, що завершуються в кінці циклу прикладання руйнуванням. Якісно такий вид обробки периферійної зони свердловини можна охарактеризувати тертям абразивних частинок об породу, результатом чого є виколювання і деяке спресовування частинок продуктів руйнування, що веде до високого охрупчення породи, яке проникає на досить значні відстані вглиб масиву.

Усі описані види абразивного зношування супроводжуються тією чи іншою мірою втомним руйнуванням. При повторних, досить високих напругах, що випробовуються одним і тим же об'ємом порід, прилеглих до контактної поверхні (особливо при чергуванні знаку напруг), в ньому виникають мікротріщини, і може відбутися місцеве поверхневе руйнування у вигляді борозен викрашування. Закономірності протікання (залежно від зміни величини напруги і числа циклів) у загальному вигляді подібні до аналогічних процесів в інших галузях техніки. Втомне зношування можливе при волочінні з прослизом, коли контакт зосереджений. У цьому випадку можливе виникнення високих контактних напруг та при досить великій кількості циклів напруг можлива поява поверхневих або підповерхневих втомних тріщин і місцеве руйнування у вигляді поверхневого відколювання або викрашування. Дія ріжучих кромок абразивних частинок на оброблений вибій у тій чи іншій мірі матиме імпульсний (ударний) характер. У цьому, власне, і полягає основна особливість процесу.

Активність рідини в зоні контакту при руйнуванні залежить від фізико-хімічної (молекулярної) спорідненості останньої та її активних складових з оброблюваною поверхнею. Руйнівна дія рідини підвищується при додаванні ПАР, що пояснюється ефектом П.О. Ребіндера [32].

На думку І.Р. Клейса, при взаємодії абразивних частинок з оброблюваними матеріалами відбувається зміна мікро- та макрогеометрії поверхні. У результаті прояву пружно-пластичної деформації на оброблюваній поверхні вже на початку процесу залишаються характерні лунки, від яких у пластичних матеріалів можуть утворитися характерні хвилі, фронт яких орієнтований перпендикуляр-

но до проекції вектора швидкості просування.

Під торцем матриці снаряда перебуватиме велика кількість абразивних частинок [74], багато з яких одночасно контактуватиме з оброблюваною поверхнею, тому їх вплив, з точки зору виконання роботи руйнування, має сумуватися. Загальну роботу абразивно-механічного руйнування виконує пакет абразивних частинок, щільність якого регулюється вмістом пустот у структурі матриці та їх розміром. При цьому поверхневий вибійний шар ГП зазнає таких змін: пружні та пластичні деформації; деформації зсуву і сколювання. Загалом описаний процес можна цілком впевнено охарактеризувати як мікрорізання.

В описаних умовах, ймовірно, буде присутній гідро-молекулярне руйнування, як форма прояву ефекту Ребіндера при проникненні рідкої фази промивальної рідини у високорозвинені субмікротріщини на оброблюваній поверхні.

Для адекватного проведення технологічних розрахунків необхідно знати величину лінійного знімання матеріалу за деякий проміжок часу, тобто поглиблення бурового снаряда, яке можна описати диференціальним рівнянням [59]

$$\frac{dx}{dt} = K_1(Q - x), \quad (2.11)$$

де Q – товщина загального лінійного шару; x – поточне знімання шару за час впливу на усю оброблювальну поверхню; K_1 – коефіцієнт руйнування

$$K_1 = \sigma_{кр} / \mu_F, \quad (2.12)$$

де $\sigma_{кр}$ – критичний тиск, при якому відбувається руйнування оброблюваної поверхні; μ_F – коефіцієнт площі або питомий імпульс:

$$\mu_F = \frac{mv}{F}, \quad (2.13)$$

де mv – кількість руху інструментальних частинок (m – маса абразивних частинок, а v – швидкість їхнього руху), що викликали руйнування; F – площа сліду рухомих частинок, що визначає масу зруйнованого матеріалу.

Величина знімання матеріалу може бути визначена як

$$G = \int_S q dS, \quad (2.14)$$

де S – сумарна площа поверхні, що обробляється; q – величина знімання матеріалу з деякого елементарного майданчика.

Тут

$$q = \sum_{i=1}^N q_i, \quad (2.15)$$

де N – кількість одиничних актів контактної взаємодії на елементарному майданчику; q_i – величина знімання після одиничного акту контактної взаємодії.

При цьому величина q_i обумовлена технологічними параметрами процесу, нерівністю оброблюваної поверхні та її властивостями. Разом з тим, зміна нерівності поверхні в процесі поглиблення взаємопов'язана зі зміною величини знімання матеріалу, що має бути враховано при розробці математичної моделі.

Таким чином, в основу математичної моделі процесу обробки поверхні ГП деякою групою абразивних частинок має бути покладена модель одиничного акту контактної взаємодії, що дозволяє визначати величину q_i .

Відомо [32], що хоча реальні частинки абразивного матеріалу мають неправильну і дуже складну форму, їх представляють у вигляді тіл правильної форми, найчастіше еліпсоїдів або сфер. Тому абразивні частинки потоку моделюються сферами, розміри яких, будучи випадковими величинами, відтворюються відповідно до закону розподілу ймовірностей, що узгоджується з відсотковим вмістом великої, основної та дрібної фракцій абразивного матеріалу.

Найбільш суттєвою класифікаційною ознакою будь-якого виду зношування виступає якісна картина рельєфу поверхні. У кожному виді зношування макро- і мікрорельєф на поверхні формується під дією багатьох факторів, основні з яких – рівень зовнішнього силового впливу на контактуючі пари, присутність абразиву та його гранулометрична характеристика, можливість охолодження, фізико-механічні властивості взаємодіючих матеріалів та ін.

Кожному характерному рельєфу на поверхні зношування відповідає певний механізм формування та відділення частки зносу. У свою чергу, механізм відділення частинки зносу обумовлює закономірності між фізико-механічними властивостями оброблюваної поверхні та інтенсивністю зношування, а також вибір критерію зносостійкості матеріалу при даному виді зношування. Кожен вид зношування можна виділити як самостійний, якщо при зіставленні з вже відомими видами зношування він відрізняється не тільки якісною картиною рельєфу та умовами його розвитку, але й критерієм зносостійкості.

З урахуванням цих передумов були систематизовані особливості різних умов зношування, основних закономірностей, рельєфу, критеріїв зносостійкості та виділені види зношування, що відрізняються зазначеними класифікаційними ознаками. Існують такі види зношування: абразивне, гідроабразивне, втомне і теплове. Кожен вид зношування відрізняється макро- і мікрорельєфом на поверхні зношування, основними закономірностями прояву зовнішнього силового впливу і механічних властивостей контактуючих поверхонь, а також певними критеріями зносостійкості; крім того, види зношування значно відрізняються умовами, за яких вони відбуваються, а саме: при терті ковзання або кочення, при кавітації, за наявності активних середовищ і т.д.

Відповідно до запропонованої авторами цієї наукової праці, в розглядуваному контексті класифікації механізмів руйнування, що реалізуються проєктованими технічними засобами, останні поділяються на снаряди ГМБ обертального типу і ударного. Звідси логічно випливає, що контактні взаємодії неситимуть комплексний, так званий абразивно-ударний характер.

Абразивне зношування матиме місце у разі наявності твердих частинок, здатних впливати на поверхню контактування шляхом утворення на ній лунок – слідів прямого статичного або динамічного занурення цих частинок. Якісною ознакою зазначеного зношування є специфічна поверхня, що є поєднанням лунок, розділених перемичками. На поверхні, схильної до абразивного зношування, немає спрямованої шорсткості у вигляді рисок, а, отже, немає відносного переміщення твердих частинок вздовж цієї поверхні [63].

При певному зовнішньому силовому впливі на поверхню контакту, використання твердої частки аналогічно дії індентора при відповідних методах ви-

значення твердості. У вказаному випадку абразивна дія твердої частинки обмежена лише невеликою поверхнею лунки, що нею утворюється, а зсувні процеси матеріалу перемичок зведені майже до мінімуму.

При абразивно-ударному зношуванні зносостійкість контактуючих поверхонь пов'язана з рівнем зовнішнього силового впливу. Енергія удару впливає на швидкість і механізм зношування, а також на критерій зносостійкості. Абразивно-ударне зношування в певних умовах може бути ускладнене додатковим переміщенням поверхонь, що взаємодіють, або частинок абразиву. Мається на увазі випадок, коли удар супроводжується короткочасним прослизанням.

Гідроабразивно-ударне зношування відбувається при взаємодії поверхонь, у разі наявності в зоні контакту одночасно рідини і твердих частинок, здатних впливати на поверхню зношування. При цьому виді зношування взаємодія твердих частинок з поверхнею зношування відбувається прямим зануренням або відносним переміщенням. Пряме занурення частинок пов'язане з ударом, відносне переміщення – з витісненням рідини із зони контакту. При русі з рідиною частинки зношують поверхню, що обробляється шляхом мікрорізання. В результаті наявності зазначених видів взаємодії, на поверхні зношування формується складний мікрорельєф, що включає ділянки абразивно-ударного та гідроабразивного зношування. Таким чином, механізм гідроабразивно-ударного зношування носить комплексний характер, який включає в себе елементи абразивно-ударного та гідроабразивного зношування.

Відмінність механізмів зношування обумовлює нерівномірний знос поверхні контакту. Гідроабразивно-ударне зношування проявляється при певному зовнішньому впливі на поверхню контакту. Енергія удару істотно впливає на динаміку гідроабразивно-ударного зношування та його розвиток у часі.

Так зване ударно-втомне зношування оброблюваного матеріалу (ГП) відбувається при багаторазовому зіткненні поверхонь, що не мають в зоні контакту твердих частинок, здатних впливати на них. Зношування при цьому збільшується поступово. Для розвитку ударно-втомного зношування необхідне велике число циклів динамічного впливу в мікрооб'ємах поверхонь, що контактують.

Ударно-теплове зношування відбувається при зіткненні контактуючих поверхонь, схильних, за умовами взаємодії, до значних об'ємних нагрівань. Елементарним процесом ударно-теплого зношування є відрив частинок породи від поверхні зношування в результаті багаторазового пластичного деформування або безпосередньо зрізу, пов'язаного з використанням твердих частинок при ударі. При ударно-тепловому зношуванні визначальну роль відіграє можливість охолодження поверхонь, що контактують. Інтенсивність ударно-теплого зношування визначається рівнем зовнішнього силового впливу, механічними властивостями та температурою контактуючих пар. Виходячи з загальних уявлень про процеси, що супроводжують абразивно-механічний ударний спосіб буріння, можливість прояву, а тим більше, скільки-небудь вагома роль в механізмі руйнування ГП саме теплового зношування – малоймовірні [32].

Наведений теоретичний і фактичний матеріал дає досить чітке уявлення про картину вибійних процесів руйнування спеціальною матрицею і дозволяє

визначити запропонований вид формування периферійної зони свердловини як досить ефективний, а також сформулювати його основні закономірності.

Буріння свердловини (специфічної гірської виробки) здійснюється по ГП, які знаходяться у напруженому стані всебічного стиснення, причина якого є сили, що виникають у зв'язку з тектонічними рухами в земній корі, а також з деякими особливими за змістом фізико-хімічними процесами [75]. Під дією зовнішніх сил ГП деформуються, таким чином проявляють пружні та пластичні властивості, а також ГП руйнуються [69]. Якщо кубик ГП стиснути рівними за величиною силами $P_x = P_y = P_z$, лінії дій яких співпадають з відповідними просторовими вісями x, y, z , то при будь-яких значеннях він не зруйнується, тому що буде перебувати у стані рівномірного всебічного стиснення (рис. 2.4).

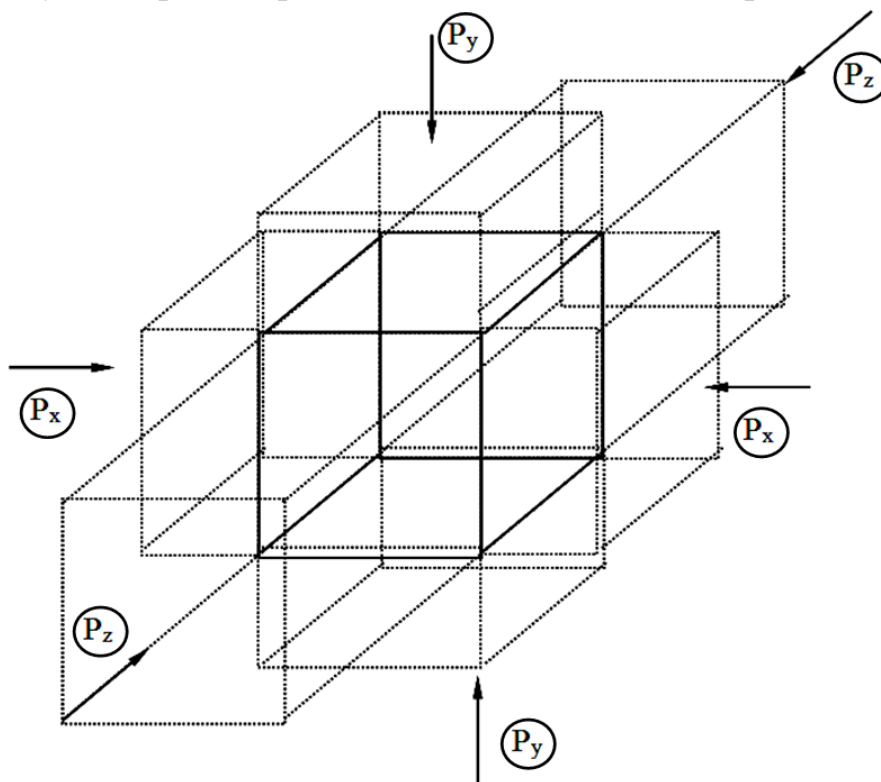


Рис. 2.4. Схема, яка моделює умови всебічного стиснення зразка ГП

Розглянемо означений процес у своєму розвитку. Зміною співвідношення між силами P_x, P_y і P_z можна досягти руйнування зразка, а величина напруги, за якої це може статися, в даному випадку буде залежати від властивостей досліджуваної ГП та геометричних розмірів зразка. У тому випадку, якщо кут пружної рівноваги збігається за фізичною сутністю з кутом зовнішнього опору, то він являє собою кут, під яким може відколотися елемент ГП під дією власної маси – це відповідає умові відсутності обмежень для розвитку деформацій руйнування. При двохосьовому стисненні межа міцності більшості ГП вдвічі більше межі міцності при одноосьовому стисненні в тих же умовах.

На основі вивчення геологічної характеристики деяких родовищ корисних копалин [76], на яких були пробурені свердловини, зроблений висновок про те,

що до найбільш міцних ГП, що важко розбурюються, відносяться, серед інших, кварцити і кристалічні сланці, які і були обрані в якості об'єкта досліджень.

Найбільш важливі фізичні властивості основних ГП, деякі з яких були піддані дослідженням, наведені в табл. 2.1 [32].

Вплив ПР на фізико-механічні властивості і процеси руйнування ГП, обумовлений в основному адсорбцією – підвищенням концентрації одного з компонентів середовища на межі розділу фаз. Вона забезпечує зниження поверхневої енергії твердого тіла, змінює сили зв'язку для приповерхневих атомів і збільшує параметри решітки. Для вивчення процесів, що протікають на межі розділу «тверде тіло - рідина», найбільш доцільно застосовувати ІЧ-спектроскопію. Цим методом можна досліджувати адсорбцію окремих молекул адсорбата на певних центрах або конкуренцію між кількома адсорбатами за окремі центри адсорбції. Поверхні більшості адсорбентів хімічно неоднорідні, так як на них знаходяться різні центри з високою і низькою енергією адсорбції, як полярні, так і неполярні групи, домішкові атоми і адсорбовані з навколишнього середовища активні хімічні речовини [77].

Таблиця 2.1

Деякі фізичні властивості найпоширеніших ГП основних родовищ корисних копалин

Типи	Фізичні властивості					
	Коефіцієнт пористості, K_n , %	Щільність, ρ , г/см ³	Модуль Юнга, $E \cdot 10^{11}$ Па	Модуль зсуву $\cdot 10^{11}$, Па	Коефіцієнт Пуассона	Опір стискуванню, кг/см ²
Граніти	0,3-0,12	2,2-2,98	0,2-0,85	0,16-0,28	0,08-0,34	1000-3000
Діорити	0,4-5,0	2,47-3,03	0,34-0,87	0,28-0,37	0,10-0,33	1800-2400
Габро	0,2-6,2	2,5-3,3	0,34-1,22	0,03-0,4	0,16-0,3	1030-3460
Базальти	0,4-40	2,1-3,06	0,1-1,2	0,27-0,34	0,04-0,36	1800-4400

У процесі дослідження методом ІЧ-спектроскопії твердий адсорбент у вигляді порошку занурюють в розчин, з якого відбувається адсорбція. Після встановлення рівноваги, тверду речовину видаляють з розчину і, якщо необхідно, осушують, після чого реєструють спектр адсорбенту. Рівноважні концентрації адсорбату в розчині можна оцінити відносно спектрів розчинів окремо. Якщо вихідна і рівноважна концентрації істотно розрізняються, величину адсорбції можна отримати з результатів спектроскопічних вимірювань [32]. Відокремити досліджувану тверду речовину від отриманого розчину можна фільтруванням або центрифугуванням.

Дослідження з моделювання процесу руйнування ГП різними породоруйнівними інструментами при бурінні свердловин показали, що найбільш точно його можна відтворити шляхом вдавнення штампа в зразки і реєстрації відповідних показників [49]. Залежно від характеру впливу сил при вдавненні штампа розрізняють статичну і динамічну міцність і мікротвердість ГП.

Статичну міцність гірських порід визначають за методом Л.О. Шрейнера на приладі УМГП-3, динамічну – методом толочіння і мікротвердість на приладі ПМТ-3.

Процеси розробки родовищ корисних копалин неодмінно пов'язані із необхідністю проведення значного комплексу робіт, метою яких є отримання каналів зв'язку із покладом. В якості останніх можуть виступати різні капітальні гірські виробки та їх специфічна категорія – бурові свердловини; їх отримання в товщі порід можливо шляхом спрямованого руйнування породи на вибої. На відміну від методів спорудження класичних гірських виробок, за буріння свердловин у безпосередньому контакті із ініціатором руйнівних процесів знаходиться достатньо незначний об'єм ГП, який перебуває під впливом всебічного стиснення, внаслідок комплексного прояву гірського, гідростатичного, гідродинамічного і пластового тисків. Саме вказані обставини, а також різні за проявом фізико-механічні властивості ГП, багато в чому, і визначають особливості вибійних процесів руйнування гірського масиву. Та оскільки, здебільшого, застосовують чисто механічний метод руйнування за допомогою спеціального інструменту, на ефективність вибійних процесів безпосередній вплив має його конструктивне виконання та режимний регламент відпрацювання.

Значна гама варіантів оформлення робочої частини ПРІ обумовлена присутністю для ГП цілого ряду структурно-механічних особливостей. Вони і визначають механізм та загальну спрямованість руйнівних процесів, детальне вивчення яких можливе на підставі вивчення їх елементарного акту.

Беззаперечним є те, що процеси руйнування ГП, у тому числі за буріння свердловин, є у вищому ступені комплексними і підlegлими впливу багатьох чинників. Оскільки вивченню підданий саме механічний спосіб руйнування, основним параметром тут буде виступати осьове навантаження, створюване в цілому для ПРІ, та його елементів озброєння зокрема [12].

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2

У ході дослідження, присвяченого визначенню передумов підвищення механічної швидкості буріння, встановлено основні закономірності фізичних процесів, що визначають ефективність руйнування гірських порід та розвиток прогресивних способів буріння.

1. З'ясовано, що фізика процесів руйнування гірських порід базується на закономірностях передачі енергії від бурового інструмента до гірського масиву, утворенні локальних зон напруження та подальшому формуванні тріщин і уламків; ефективність цього процесу залежить від виду енергії (механічної, гідравлічної, термічної), режиму навантаження та властивостей порід.

2. Встановлено, що механічна швидкість буріння є комплексним показником, який визначається режимними параметрами буріння (осьове навантаження, частота обертання, витрата промивальної рідини), характером взаємодії інструмента з породою та енергетичними умовами руйнування.

3. Проаналізовано механізми руйнування порід на вибої, що залежать від фізико-механічних властивостей гірських порід (твердість, тріщинуватість, пластичність) і конструкційних особливостей бурового інструменту; встановлено, що максимальна ефективність досягається за умов узгодження енергетичних параметрів процесу з характеристиками породи.

4. Виявлено, що підвищення механічної швидкості буріння можливе шляхом раціонального вибору методу руйнування, удосконалення конструкцій доліт і бурових систем, а також використання комбінованих (механіко-гідравлічних або механіко-фізичних) технологій, які забезпечують зниження енерговитрат і підвищення продуктивності; отже, отримані результати підтверджують, що подальше вдосконалення процесів руйнування гірських порід має ґрунтуватися на розробці інноваційних способів впливу на породу, що забезпечують зростання швидкості та надійності процесу буріння свердловин.

РОЗДІЛ 3. ДЕЯКІ АСПЕКТИ СТВОРЕННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ СХЕМ ЦИРКУЛЯЦІЇ СПЕЦІАЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ РІДИН ПРИ СПОРУДЖЕННІ СВЕРДЛОВИН

3.1 Вивчення особливостей підходів до розробки порядку організації циркуляційних процесів при спорудженні свердловин

Успішність буріння свердловин без виникнення технологічних ускладнень, а також якість їх подальшого цементування значною мірою залежать від правильного вибору та організації процесу промивання таких гірських виробок [78]. Саме промивання забезпечує ефективне очищення вибою, стабільність стінок свердловини, відведення шламу та підтримання необхідного гідродинамічного режиму в зоні буріння. На сучасному етапі розвитку бурової техніки та технологій неможливо уявити глибоке й надглибоке буріння без досконало налагодженого процесу промивання, оскільки саме він визначає безперервність роботи, збереження цілісності свердловини й довговічність бурового інструменту. Недостатня ефективність очищення вибою або порушення циркуляції ПР можуть призвести до зниження швидкості проходки, обвалів, прихоплення БС та навіть аварійного припинення буріння. Водночас, удосконалення технологічних процесів промивання свердловин є надзвичайно складним завданням. Це зумовлено великою кількістю наукових і технічних досліджень, що присвячені даній проблематиці, а також значною різноманітністю підходів і висновків різних авторів. Така розбіжність у наукових поглядах пояснюється складністю фізико-гідродинамічних процесів, які відбуваються під час циркуляції промивальної рідини в умовах різної глибини, тиску, температури та складу ГП.

Для подальшого розвитку технологій глибокого та надглибокого буріння необхідне поглиблене дослідження процесів промивання, спрямоване на раціоналізацію параметрів циркуляції, удосконалення складу ПР, а також розробку систем керування, які б забезпечували стабільність і ефективність очищення свердловин у будь-яких геолого-технічних умовах [79].

При бурінні свердловин різного призначення, винесення вибуреної ГП на денну поверхню відбувається двома шляхами: дрібні частинки шламу (розміром менше 0,5 мм) «переходять у розчин», різко збільшуючи його в'язкість і вміст у ньому твердої фази, великі ж уламки ГП виносяться на денну поверхню за рахунок швидкісного напору ПР.

Накопичення вибуреної породи на вибої споруджуваної свердловини залежить від механічних, гідравлічних і технологічних факторів, які мають місце в процесі буріння, а також від щільності і міцності розбурюваних гірських порід та режиму їхнього руйнування. Так, при високих осьових навантаженнях на долото, розбурювання слабоміцних порід викликає підвищення швидкостей буріння на початку рейсу, але потім внаслідок активного накопичення вибуреної породи на вибої різко знижуються темпи поглиблення свердловини [80].

Вибурена порода накопичується на вибої так само і за випадку подачі недостатньої кількості ПР, що не забезпечує винесення та транспортування зруй-

нованої ГП з вибою споруджуваної свердловини.

Технологічна невідповідність кількості поданої ПР на вибій призводить до того, що в зоні роботи ПРІ утворюється до 85 - 95% значних за розміром частинок шламу, на подрібнення якого потрібно до 50 - 75% потужності, яка підводиться до бурового долота. Крім того, збільшення вмісту твердої фази в ПР веде до різкого зниження темпу руйнування ГП, зростання абразивного зносу бурового інструменту, а це, в свою чергу, знижує його працездатність і довговічність. За таких умов буріння важко отримати високі техніко-економічні показники, оскільки такий режим буріння є вельми неефективним [81].

Слід зазначити, що не менш важливу роль у накопиченні вибуреної породи відіграє також і сам режим промивання свердловини.

Винесення частинок вибуреної породи потоком ПР може бути здійснено тоді, коли його висхідна швидкість перевищуватиме швидкість занурення частинки і абсолютну швидкість підйому її з вибою свердловини. Однак у реальному потоці ПР в свердловині розподіл швидкостей по перерізу потоку залежить від багатьох факторів: форми перерізу стовбура свердловини, реологічних властивостей ПР, режиму та швидкості прокачування (циркуляції) ПР, форми та щільності уламків зруйнованої ГП, співвідношення між лінійними розмірами частинок шламу та поперечними розмірами кільцевого простору свердловини та ін. Тому швидкість винесення вибурених частинок потоком ПР носить дуже складний характер, який ще занадто слабо вивчений і вимагає як лабораторного, так і промислового комплексного вивчення та аналізу [82].

Складність адекватної оцінки виносу вибуреної породи з вибою свердловини та з затрубного простору обумовлена, перш за все, пульсацією швидкостей потоку, зміною швидкостей течії по стовбуру внаслідок його значної кавернозності, непередбачуваної зміни конфігурації тощо [83].

Очищення вибою свердловини від вибуреної ГП є складним гідродинамічним процесом. У більшості робіт з промивання свердловин розглядається лише винос вибуреної породи з кільцевого простору свердловини. Досить мало відомостей щодо винесення шламу при промиванні похилих свердловин [54].

Режим промивання вибою свердловини істотно позначається на реалізації гідравлічної потужності струменя бурового розчину при руйнуванні ГП буровими долотами з гідромоніторним ефектом [12].

Підвищення реологічних характеристик ПР значно погіршує очищення вибою від вибуреної породи, збільшує гідродинамічні опори та втрати тиску у циркуляційній системі споруджуваної свердловини.

Виконання різних за змістом та потребами технологічних операцій, пов'язаних з проведенням свердловин і явища, що при цьому виникають, до прикладу це різкі зміни гідродинамічного тиску, які виникають в свердловині при проведенні спускопідйомних операцій (СПО) з бурильною колоною (БК), також впливають на транспортувальну і утримуючу здатність ПР.

У підтримці стовбура свердловин в належному чистому стані велике значення має застосування ПР, вільних від сторонніх твердих частинок (вибуреної породи), що повинно досягатися високоякісним очищенням ПР від бурового

шламу. На рис. 1.2 наведено характеристичні залежності основних показників процесу буріння від вмісту твердої фази у ПР [2].

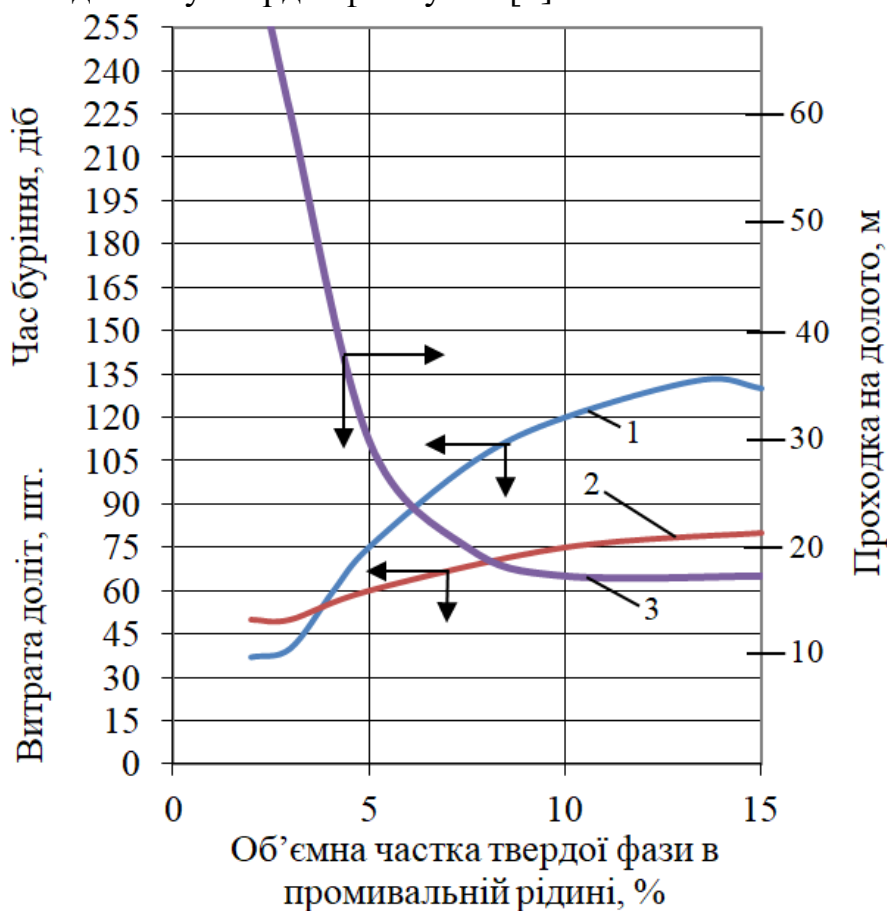


Рис. 3.1. Вплив твердої фази в ПР на показники процесу буріння: 1 – витрата доліт; 2 – час буріння; 3 – проходка на долото

Якість ПР, в загальному випадку, характеризується такими важливими параметрами, як густина, в'язкість, статична напруга зсуву, водовіддача, кількість піску та ін. На всі ці параметри значною мірою впливає фракційний склад та загальний вміст твердої фази у ПР.

У процесі буріння ПР постійно збагачується твердою фазою, що призводить до збільшення, насамперед, густини. Це не завжди є виправданим, оскільки призводить до зростання гідростатичного тиску, що, своєю чергою викликає зниження механічної швидкості буріння, підвищення витрати енергії. Залежність густини ПР від вмісту твердої фази визначається з виразу

$$\rho_p = T_1(\rho_{TB} - \rho) + \rho, \quad (3.1)$$

де ρ_p – густина розчину (ідентично також ПР), г/см³; T_1 – об'ємний вміст твердої фази; ρ_{TB} – щільність твердої фази, г/см³; ρ – густина дисперсійного середовища, г/см³.

У свою чергу щільність твердої фази ρ_{TB} , визначається за наступним співвідношенням:

$$\rho_{TB} = T_1(\rho_{III} - \rho_2) + \rho_2, \quad (3.2)$$

де $\rho_{ш}$ – щільність шламу порід, що розбурюються, г/см³; ρ_2 – щільність глини, раніше введеної в розчин (або ПР) в якості дисперсної фази.

Позначений об'ємний вміст шламу у твердій фазі T_1 можна знайти, використовуючи таке рівняння

$$T_1 = \frac{V_{ш}}{V_{ТВ}}, \quad (3.3)$$

де $V_{ш}$ – об'єм шламу, см³; $V_{ТВ}$ – об'єм твердої фази, см³.

Легко бачити, що $\rho_{ш} \approx \rho_2$, $\rho_{ТВ} = \rho_2 = const$, при цьому залежність (1.6) носить умовно лінійний характер (рис. 3.2).

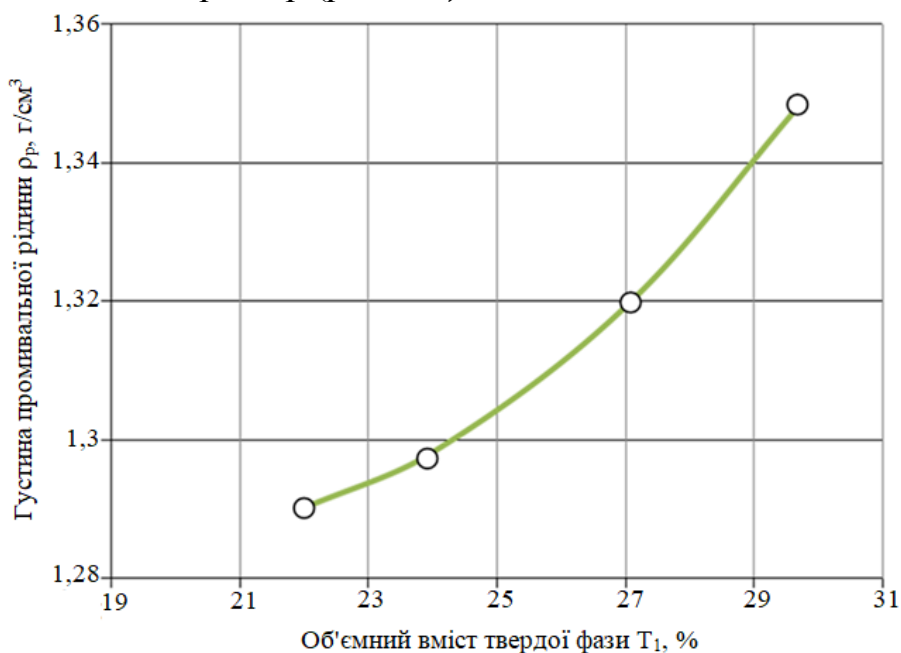


Рис. 3.2. Залежність густини ПР від вмісту твердої фази

В'язкість – найважливіший параметр ПР; вона визначатиме ступінь проникнення ПР в пори та тріщини порід, а також величину гідравлічних опорів у циркуляційній системі свердловини [24]. Зі збільшенням в'язкості погіршуються умови очищення свердловини від шламу, самої ПР в процесах регенерації від шламу, та знижується механічна швидкість буріння. Тому в'язкість ПР слід підтримувати, за можливості, якомога мінімальною. Але в процесі збагачення ПР твердою фазою, в'язкість ПР є функцією не лише вмісту твердої фази в буровому розчині, але і її фракційного складу. При цьому, чим вища дисперсність твердої фази в буровому розчині, тим вища здатність його до структуроутворення, і тим самим вища в'язкість ПР. Зауважимо, що фракційний склад твердої фази впливу на густину ПР практично не має.

Крім перерахованих вище факторів на в'язкість ПР значною мірою впливають її температура, мінеральний склад твердої фази, якість дисперсійного середовища та ін., у зв'язку з чим аналітичне вираження залежності в'язкості ПР від вмісту твердої фази та її фракційного складу занадто утруднено.

На підставі проведених лабораторно-аналітичних досліджень було отримано залежність в'язкості ПР від вмісту твердої фази (рис. 3.3).

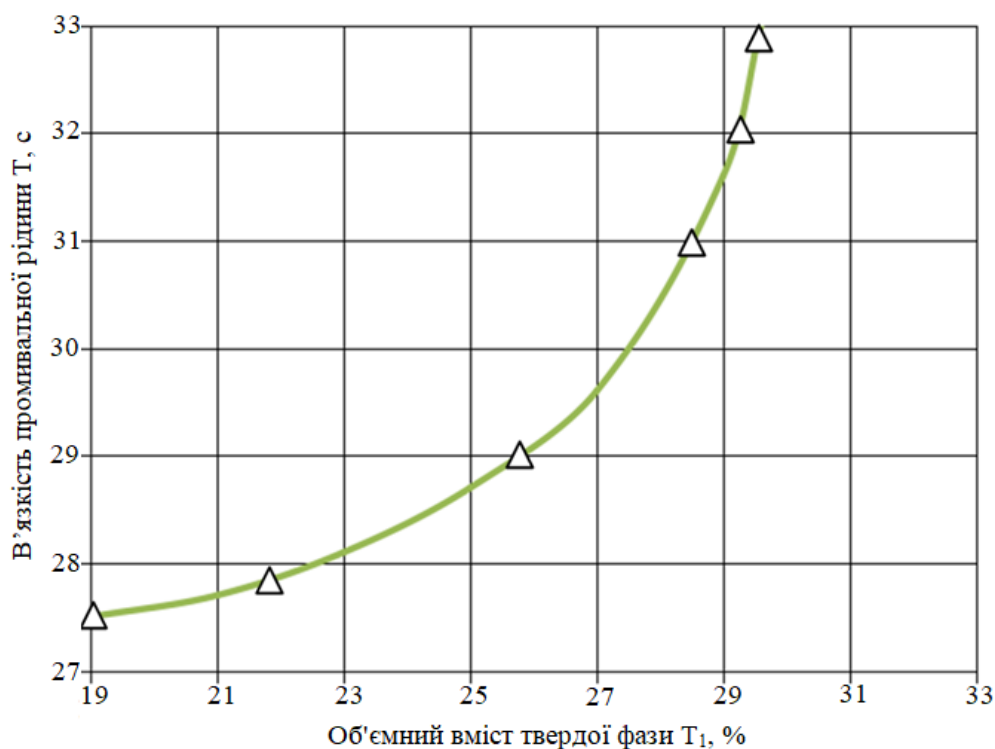


Рис. 3.3. Залежність умовної в'язкості ПР від вмісту твердої фази

Як впливає з наведеного графіку, зображеного на рис. 3.3, в'язкість ПР підвищується зі збільшенням вмісту твердої фази нелінійно.

ПР – здебільшого глинисті розчини, за ступенем дисперсності частинок відносяться до суспензій, а за фізико-хімічними властивостями можуть бути віднесені до колоїдів [84]. Частинки твердої фази такого розчину можуть перебувати у зваженому стані довгий час, а сам розчин може переходити з рідкого рухомого стану в малорухливу желеподібну масу. Очищення такого розчину від частинок вибуреної породи є складним та трудомістким процесом. Саме для таких умов раціональним виявляється застосування методів флокуляції; за означеного явища відбувається укрупнення частинок, тобто утворення пластівців, що седиментують під дією сили тяжіння. Процес флокуляції частинок може бути здійснений поверхнево-активними речовинами (ПАР) [85], які вибірково адсорбуються на поверхні частинок, як мінерального, так і органічного походження, наприклад поліакриламід (ПАА). Проведені дослідження дозволили зробити такі висновки: для кожного виду суспензій та ГП існують оптимальні дозування флокулянту, перевищення яких викликає погіршення ефективності процесу седиментації; для ефективного застосування реагентів-флокулянтів необхідно користуватися наявними літолого-фаціальними картами провінції в яких ведеться буріння свердловин – це дозволить вести поінтервальну обробку ПР флокулянтом залежно від складу та фізико-хімічних властивостей розбурених ГП. Основною вимогою до процесу регенерації ПР є те, що застосовувані очисні комплекси (природні – жолобна система та відстійники, або примусова, наприклад вібросита) повинні забезпечувати повне відділення від ПР зруйнованої ГП.

Сталий процес роботи ПРІ на вибої свердловини повинен завжди являти собою стан динамічної рівноваги процесів руйнування ГП та видалення продуктів руйнування в кільцевий простір [37]. Тому для правильного розуміння питань промивання вибою свердловини необхідно комплексно знати основні закономірності зазначених процесів та вплив різних факторів на них.

Стосовно швидкості потоку та витрати ОА можна констатувати наступне: з цих взаємопов'язаних факторів найбільше значення має швидкість потоку, причому її горизонтальна складова, спрямована вздовж породного вибою. Величина витрати ОА впливає головним чином на видалення зруйнованої породи по стовбуру споруджуваної свердловини, швидкість потоку безпосередньо забезпечує видалення частинок шламу з самого вибою.

При русі ПР вибоєм свердловини, частинка шламу, яка розташована на його поверхні, випробовує вимивну дію потоку ПР, що рухається паралельно вибою. При цьому можливі різні варіанти відриву частинки від вибою (рис. 3.4).

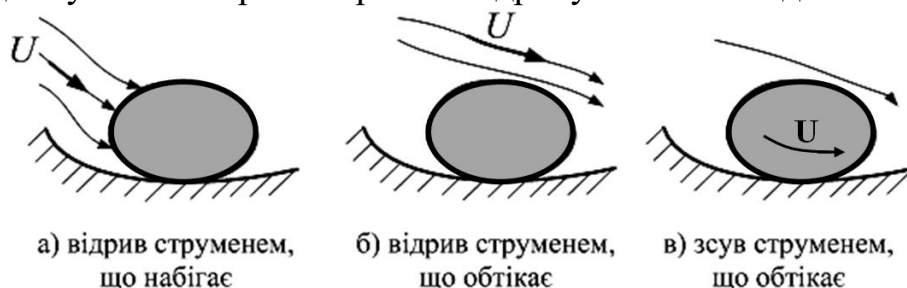


Рис. 3.4. Огляд можливих схем відриву частинок зруйнованої ГП від вибою

Рух ПР безпосередньо на вибої споруджуваної свердловини характеризується тим або іншим ступенем турбулентності потоку, значення якого визначається величиною критерію Рейнольдса [86], розрахованого за формулою

$$Re = \frac{U d_e \rho_p}{\mu}, \quad (3.4)$$

де U – швидкість потоку ПР на вибої свердловини, м/с; d_e – еквівалентний діаметр потоку ПР, м; μ – динамічна в'язкість ПР, Па·с.

В процесі буріння на вибої утворюється прикордонний шар, в якому при малих швидкостях руху ПР може встановитися або ламінарний режим (характеризується параболічним розподіленням швидкостей), або турбулентний (характеризується сплосченим розподілом швидкостей), та незалежно від режиму руху в прикордонному шарі – ламінарний підшар, який суттєво впливає на умови руху зруйнованих частинок ГП [87]. Товщина ламінарного підшару залежить від в'язкості ПР та швидкості її руху. Товщину ламінарного підшару та швидкість руху в ньому пропонується визначати за наступними формулами

$$h_a = a \frac{\nu}{U_{sep}} \quad (3.5)$$

та

$$U_y = by \frac{U_{sep}^2}{\nu}, \quad (3.6)$$

де h_l – товщина ламінарного підшару, м; ν – кінематична в'язкість ПР, $\text{м}^2/\text{с}$; $U_{\text{сер}}$ – середня швидкість руху ПР в зоні вибою, $\text{м}/\text{с}$; U_y – швидкість руху ПР в ламінарному підшарі на відстані y від вибою, $\text{м}/\text{с}$; a і b – коефіцієнти, які залежать від коефіцієнту гідравлічного опору, густини ПР та інших чинників.

Таким чином можна зробити наступний висновок. Одні частинки ГП, що утворилися під впливом ПРІ, піддаються дії прикордонного шару, інші попадають в зону дії ламінарного підшару (рис. 3.5). В результаті вказаного явища частина шламу залишається не винесеною потоком ПР, що призводить до подальшого його подрібнювання та підвищеного зносу ПРІ.

Неважко бачити, що згідно з математичними виразами (3.5) та (3.6), при підвищенні швидкості руху ПР в привибійній зоні свердловини в два рази, товщина ламінарного підшару зменшиться в два рази та в чотири рази збільшиться швидкість руху ПР у ньому самому [78].

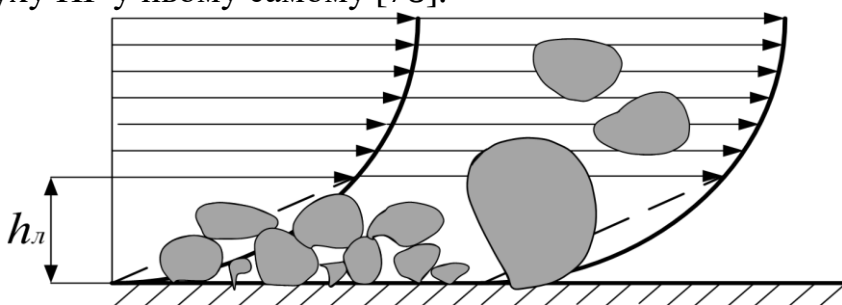


Рис. 3.5. Орієнтовний профіль швидкостей ПР в привибійній зоні споруджуваної свердловини

Основним чинником ефективності очищення вибою є турбулентний стан ПР в привибійній зоні. Інтенсивність турбулентності потоку на вибої визначається, головним чином, в'язкістними властивостями ПР. Зі зростанням в'язкості ПР знижується рівень турбулентності, а отже автоматично погіршуються умови очищення породного вибою свердловини.

Підйомна сила для кожної частинки шламу виникає внаслідок несиметричного обтікання її потоком за рахунок нерівномірності профілю швидкостей у рухомому потоці ПР, вертикальних складових турбулентної пульсації швидкості потоку, а також потоку вихорів, що виникають у придонному шарі. Підйом частинки шламу з вибою свердловини можливий тільки в тому випадку, якщо вертикальні складові турбулентних пульсацій швидкості в потоці суттєво перевищать швидкість падіння частинок в даній ПР.

Деякі принципові особливості має схема руху ОА за використання колонкового інструменту, а саме бурових коронок. Рух ПР між різцями бурової коронки безпосередньо на вибої свердловини супроводжується більшим або меншим рівнем турбулентності потоку, значення якого оцінюються за величиною критерію Рейнольдса. При малих швидкостях руху ПР у просторі під торцем коронки може встановитися ламінарний режим руху потоку з параболічним розподілом швидкостей за перерізом. При критичному значенні параметра Рейнольдса ламінарний режим перетворюється на турбулентний [88], для якого профіль швидкостей характеризується більш швидшим наростанням швидкостей

біля поверхні вибою, а після цього і більш рівномірним їхнім розподілом. При турбулентному русі потоку ПР біля стінки каналу завжди існуватиме ламінарний підшар, середовище в якому рухається тільки ламінарно, і де найбільш високою мірою проявляються його в'язкісні властивості.

Розрахунок необхідної кількості ПР для очищення свердловини з умови виносу частинок шламу в кільцевий простір свердловини без урахування процесів очищення вибою призводить до того, що потрібна швидкість висхідного потоку визначається в основному тільки густиною ОА [2]. Зменшення або збільшення густини призводить відповідно до збільшення або зменшення потрібної швидкості висхідного потоку ПР, а інерційні сили потоку в цьому випадку залишаються практично незмінними. В'язкість ОА в таких розрахунках не враховується, хоча істотно впливає на величину критерію Рейнольдса і на рівень турбулентності потоку, що визначає ефективність процесу очищення.

Зростання витрати має і деякий негативний вплив, оскільки збільшується гідродинамічний тиск на вибій, який притискає до нього частинки зруйнованої породи та ускладнює їхнє видалення. Для вдосконалення очищення з урахуванням цих факторів треба так підбирати ПРІ, щоб максимально використовувати горизонтальну складову швидкості потоку ОА [54].

Практика показала, що найкращі умови очищення вибою створюються при продуванні свердловин стисненим повітрям, оскільки, завдяки високим швидкостям потоку і низькій в'язкості повітря, рівень турбулентності потоку найбільш високий, а товщина ламінарного підшару найменша.

Погіршення умов очищення при промиванні свердловини глинистими ПР пов'язане зі збільшенням його в'язкості, що призводить до збільшення товщини ламінарного підшару та зниження рівня турбулентності потоку, а також енергетичних витрат на перенесення, власне, глинистих частинок, тобто твердої фази розчину. Підвищення показників роботи ПРІ при використанні розчинів із малим вмістом твердої фази, наприклад малоглинистих або полімерних [24], пояснюється посиленням у потоці ефективних турбулентних пульсацій.

Таким чином, розрахунок потрібної швидкості висхідного потоку ОА і його витрати повинен здійснюватися з урахуванням технологічних особливостей процесів очищення вибою свердловини та в'язкісних властивостей ОА.

Величина густини ПР має подвійний вплив на хід процесів очищення вибою свердловини. Зі збільшенням густини збільшується виносна здатність ПР та гідравлічна сила потоку; з іншого боку, зі збільшенням густини зростає гідростатичний тиск на вибій, який збільшує міцність породи, ускладнюючи її руйнування, а також посилює притискання вже відокремлених частинок до вибою за рахунок різниці тиску зверху та знизу частинки (це так званий диференціальний тиск). Негативний вплив густини ПР, на думку ряду авторів, має переважний вплив. За інших рівних умов найкращі результати з очищення вибою споруджуваної свердловини можна отримати за використання газорідних агентів, для яких виносна здатність значно вища, ніж для газу, та занадто слабо позначається шкідливий вплив гідростатичного тиску [32].

Відносну такого параметру, як час впливу потоку на вибій свердловини, зазначимо наступне. Вказаний фактор пов'язаний із частотою обертання, типом ПРІ та конструкцією його промивальних каналів.

Наведемо такий приклад: за шарошкового буріння прокачувана через привибійну зону ПР реалізовує виносну функцію: вона захоплює зважений в цій зоні шлам і виносить його в кільцевий простір. Можна припустити, що ця рідина рухається навколо долота у вигляді вихрового потоку. Виносна ж здатність вихрового потоку тим вище, чим вище значення його вихору швидкості. При цій інтенсивності вихору величина його швидкості зворотно пропорційна площі поперечного перерізу вихрового потоку f_v . Для привибійної зони площею поперечного перерізу вихрового потоку є площа поперечного перерізу кільцевого простору між долотом і стінкою споруджуваної свердловини. Ця площа неоднакова за висотою бурового долота.

З аналізу результатів вимірів можна стверджувати, що у шарошкових доліт f_v максимальна на рівні, який знаходиться від вибою на відстані, приблизно рівній проекції діаметру шарошки долота на вертикальну вісь, і вона дещо більше f_v біля основи долота, тобто біля вибою (рис. 3.6).

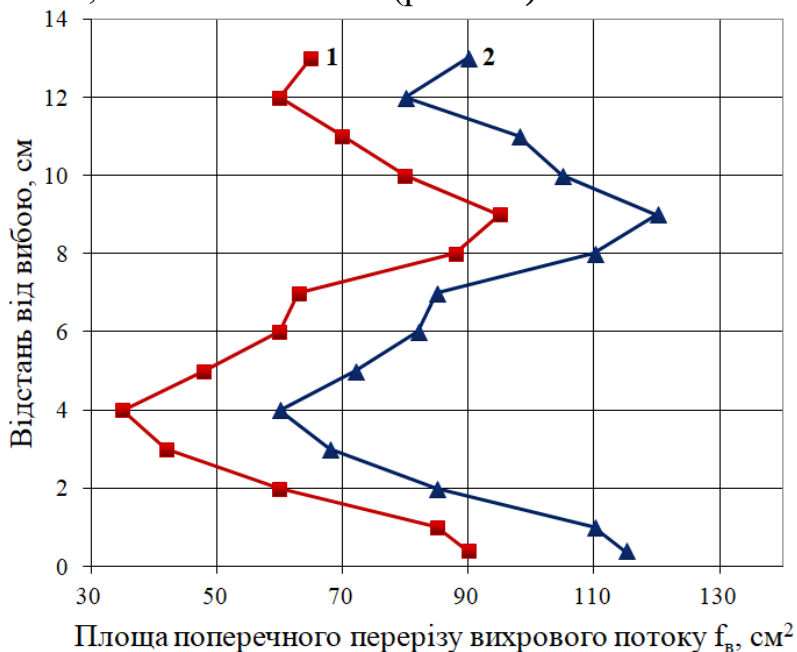


Рис. 3.6. Усереднені значення площі поперечного перерізу кільцевого простору між долотом і стінкою свердловини за висотою долота

Мінімальне значення площі поперечного перерізу вихрового потоку має на рівні козирків лап бурового долота, і воно менше максимального значення майже в 2 рази. Отже, на рівні, відповідному верхньому положенню периферійних зубів шарошок, вихор швидкості має мінімальне значення, і тому саме тут існують умови для скупчення шламу зруйнованої ГП.

Вплив розмірів частинок ГП на інтенсивність очищення свердловини проявляється наступним чином. На межі потоку та нерухомої поверхні його швидкість дорівнює нулю і поступово зростає з віддаленням від поверхні розділу, переходячи від ламінарного в турбулентний режим. При цьому великі частин-

ки, відокремлені від вибою, що більше виступають над його поверхнею, потрапляють у турбулентну область потоку з високою швидкістю і легше виносяться з вибою. Проте дрібні частинки, що притиснуті до вибою, істотно гірше видаляються. Саме тому очищення вибою свердловини відбувається краще при використанні ПРІ та способів буріння (шарошкові долота, ударно-обертальне буріння) і в породах, які дають більші частинки шламу [71].

Важливе значення для очищення вибою має також здатність ПР запобігати злипанню частинок. Таку властивість мають ті ПР, що містять ПАР, і, власне, газорідні суміші. Застосовувані в практиці спорудження свердловин ПАР, володіючи високою проникаючою здатністю, покращують очищення та полегшують руйнування ГП на вибої споруджуваної свердловини.

Частинки породного шламу є продуктом руйнування ГП, тому вивчення особливостей їхнього фракційного складу, форми та розмірів може дати практично значиму інформацію про процес буріння. Однак відбір проб шламу на гирлі свердловини буде представницьким, якщо тільки буде точно відома глибина утворення даного шламу і швидкість його підйому, що особливо важливо відносно процесів буріння безпосередньо у виробничих умовах [36].

Розмір частинок шламу за будь-яких способів буріння характерний великим діапазоном: від декількох мікрон до сантиметрів. Для оцінки можливості транспортування шламу потоком ОА приймається, зазвичай, середній розмір частинок, які разом з дрібнішими фракціями складають основну частину шламу, що утворюється. Крупність уламків зруйнованої породи залежить від ряду факторів: міцності ГП, їх мінералогічного складу, інших фізико-механічних властивостей, типу ПРІ, способу руйнування, технологічних параметрів режиму буріння і характеру промивання вибою свердловини. Як правило, при високій ефективності процесу буріння утворюється значна кількість крупної фракції бурового шламу, і, навпаки, чим нижче механічна швидкість проходки, тим дрібніше шлам. Вторинне подрібнення вже відділених від вибою уламків породи, з технологічної точки зору, небажано, оскільки призводить до додаткової витрати енергії на буріння, непродуктивного зносу ПРІ та зниження загального коефіцієнта корисної дії процесу буріння. Крім того, буровий шлам найчастіше є єдиним носієм інформації про склад і властивості ГП, і в цьому випадку цікавить його гранулометричний склад. Крім того, слід зазначити, що окремі частинки на вибої можуть бути більшими за середній розмір у декілька разів. Остання обставина, загалом, не чинить істотного впливу на процес очищення свердловини, так як ці більші частинки, піднімаючись над вибоєм, піддаються впливу бічних поверхонь БК, що обертається, внаслідок чого поступово подрібнюються і вже потім транспортуються до гирла [32].

Дослідженнями встановлено, що середній розмір частинок породного шламу залежить, перш за все, від конструкції застосовуваного ПРІ. Розмір частинок шламу більший при бурінні в тріщинуватих і зернистих ГП, при ударному впливі інструменту, при бурінні з великими значеннями осьового навантаження і мінімальною частотою обертання [24].

Вважається, що стовбур споруджуваної свердловини перебуває в належному стані, якщо в ньому відсутні затяжки, посадки та прихвати бурового інструменту, проробки тих або інших інтервалів. Особливо небезпечні зазначені ускладнення при бурінні глибоких свердловин, коли і БК, і бурова установка працюють з навантаженнями, близькими до допустимих. У сильно ускладненому стовбурі можуть відбуватися аварії, які призводять не лише до зниження характеристик техніко-економічних показників, а й до часткової або повної втрати стовбура свердловини; також вельми ускладнюється успішний спуск обсадних колон (ОК) до проєктної глибини [35]; досить часто утруднюються геофізичні дослідження, інколи ж вони закінчуються аварійними роботами.

Основною з причин негативного стану стовбура свердловини є сильна його зашламованість. Уся зруйнована ГП, що потрапляє в стовбур свердловини, повинна своєчасно видалятися на денну поверхню. Продукти руйнування ГП у вигляді шламу надходить, зазвичай, не тільки з вибою свердловини, але і зі стінок, як в результаті жолобоутворення, необхідності проробки стовбура свердловини, викликаного звуженням його через пластичну деформацію і набухання ГП в стінках свердловини, так і в результаті осипів і обвалів.

Зауважимо наступне: розмір частинок ГП у вигляді шламу, що надходять на вибій внаслідок порушення міцності стінок споруджуваної свердловини, у багато разів більший за розмір частинок, що вибурюються на породному вибої, і винесення їх на денну поверхню значно важче.

Джерелами активного накопичення бурового шламу, що викликає сальнікоутворення та інші ускладнення, часто служать місця всіляких (особливо різних) розширень кільцевого простору свердловини.

У процесах підтримки стовбура свердловини в чистому стані велике значення має застосування ПР, вільних від вмісту сторонніх твердих частинок, що повинно досягатися високоякісним очищенням ПР від бурового шламу. Завдання це дуже ускладнюється при розбурюванні ГП схильних до швидкого диспергування та розчинення в ПР; для виключення або мінімізації зазначених явищ слід обмежувати тривалість контакту бурового шламу з ПР.

Для нормального перебігу процесу буріння необхідно видаляти з вибою частинки шламу, потім виносити їх з привибійної зони і транспортувати або на поверхню, або у спеціальний шламозбірник, встановлений у нижній частині БС (наприклад, за розвідувального буріння). Недостатня очистка свердловини призводить до накопичення шламу, ускладнює процес буріння і може викликати різні за наслідками ускладнення та аварії в стовбурі свердловини. Внаслідок вказаного, тільки на очищення вибою від вибуреної породи і винесення останньої на денну поверхню припадає, орієнтовно, понад 70% всієї енергії, що витрачається на спорудження свердловини.

Не останню роль у досягненні певної досконалості комплексних процесів очищення свердловини відіграє також і геометрична форма частинок шламу; проте, до цього часу, немає єдиної інженерної методики встановлення визначальних параметрів саме форми частинок бурового шламу [2].

Відомий дослідник К. Вільямс вважає виправданим при розрахунку швидкостей падіння частинок бурового шламу враховувати їхню форму за допомогою деякого параметра δ , який певним чином характеризує ступінь сплюснутості частинок і визначається за формулою

$$\delta = t/d_q, \quad (3.7)$$

де t – товщина частинки бурового шламу ГП; d_q – діаметр частинки шламу ГП.

Причому можна приймати в якості параметру d_q максимальний діаметр кола, описаного навкруги частинки ГП, і як t – товщину частинки шламу ГП, заміряну за нормаллю до площини цього кола.

Дослідження гранулометричного складу продуктів руйнування беззаперечно доводять, що форма частинок шламу дуже різноманітна, проте її завжди можна уподібнити певній геометричній фігурі. При цьому слід пам'ятати, що дрібні шорсткості та заглиблення на поверхні частинок бурового шламу, в процесі її обтікання, заповнюються ПР, яка утворює нерухомий шар [37]. Це надає частинкам шламу значну величину обтічності при їх русі.

Необхідно підкреслити наступне: рух висхідного потоку ПР в споруджуваній свердловині має цілий ряд особливостей, які комплексно впливають на умови транспортування частинок породного шламу:

1. Значна різноманітність геометричних форм частинок шламу як для різних умов буріння, так і одночасно в одному потоці.

2. Доволі широкий діапазон розмірів частинок продуктів руйнування ГП, що одночасно піднімаються потоком ПР, і наявність деякої кількості частинок більших, ніж середній розрахунковий розмір.

3. Стиснені умови руху потоку ПР з частинками шламу ГП в кільцевому просторі свердловини або всередині БТ.

4. Вельми складний просторовий характер руху потоку ПР, спричинений обертанням БК та вибірного БС.

5. Ексцентричне, за певних техніко-технологічних умов, розташування БТ у стовбурі споруджуваної свердловини.

Вивчення особливостей свердловинних циркуляційних процесів однозначно доводить, що кожен із розглянутих факторів впливає на характер транспортування частинок шламу, але враховувати їх занадто складно.

Вважається, що найбільш суттєвий вплив, який має враховуватися при аналізі умов винесення бурового шламу зі стовбуру свердловини, чинить обмеженість простору циркуляції ПР та обертання БК. Обмеженість простору кільцевого зазору, або перерізу БТ, впливатиме на винос частинок за рахунок зміни швидкості потоку по перерізу. Частинки бурового шламу, в загальному випадку, за рахунок різниці швидкостей потоку на їх межах (дія так званої «підйомної» сили) переміщуються до ядра потоку ПР і транспортуються з більшою швидкістю, ніж у необмеженому потоці з такою самою середньою швидкістю.

Наявність і необхідність обертання колони БТ чинить подвійний вплив на характер руху потоку ПР і, відповідно, на умови винесення шламу. При концентричному розташуванні БК щодо свердловини, їх обертання передається потоку ПР і відтак відбувається його часткове «закручування», тобто, крім поступа-

льного руху, виникає обертальний рух потоку, а траєкторія його переміщення стає спіральною. Закручування потоку призводить до збільшення його сумарної швидкості і в результаті, як слідство – до збільшення його виносної здатності, хоча час підйому частинок може збільшитися за рахунок збільшення шляху руху до поверхні (по спіралі). При ексцентричному розташуванні БТ, що є найбільш характерним, особливо для умов розвідувального буріння, швидкість руху ПР в кільцевому перерізі розподіляється нерівномірно і у вузьких частинах перерізу виникають застійні зони, де ПР взагалі не рухається. Частинки шламу, потрапляючи в застійні зони, зупиняються, відбувається накопичення шламу і свердловина зашламовується. Обертання БК в таких випадках забезпечує рівномірне перемішування потоку по всій площі кільцевого перерізу, що сприяє суттєвому поліпшенню умов виносу шламу.

Наведемо такий показовий приклад: частинки транспортованого твердого тіла розміром 0,295 - 0,417 мм падають в рідині при обертанні БК за частоти $n = 88 \text{ хв}^{-1}$ повільніше на 61,5%, а потрібна швидкість висхідного потоку ПР в цьому випадку може бути зменшена на 97,5%. Таким чином, кількість оборотів БК не тільки впливає на збільшення темпу руйнування ГП, але й має розглядатися як один із найголовніших факторів, що зумовлює інтенсивність винесення продуктів руйнування зі свердловини.

Також встановлено наступне [2]: при обертанні БТ підйомна сила потоку ПР зростає значно при структурному режимі течії, а при турбулентному – меншою мірою, причому, досягнувши деякого найвищого значення, стабілізується. Збільшення числа обертів колони з 35 до 150 хв^{-1} мало впливає на швидкість підйому. ПР з малими в'язкістю та міцністю структури мають більшу підйомну силу, особливо для малих частинок, ніж ПР з високими структурно-механічними властивостями. Зазначене явище може бути пояснено у такий спосіб: режим руху ПР з високою в'язкістю зазвичай структурний, а умови підйому плоских частинок при цьому режимі є несприятливими. Якщо плоска частинка розташовується найбільшою поверхнею, тобто площиною перпендикулярно потоку, за рахунок різних швидкостей кожного шару рідини структурного потоку відбувається поворот частинки на 90° . Плоска поверхня стає паралельно напрямку руху і відтісняється в ділянку нижчих швидкостей, до стінки свердловини. Малов'язкі ПР забезпечують турбулентний режим їх руху, при якому розглянуте явище не спостерігається, так як епіюра швидкостей турбулентного потоку майже рівномірна, і частинки рухаються разом з усім потоком. Звідси можна зробити висновок про те, що вплив турбулізації потоку на виносну здатність ПР перевищує значення структурно-механічних властивостей. Врахувати кількісно вплив обертання БК на умови винесення частинок шламу складно. Позитивність впливу обертання БС на умови винесення шламу полягає в тому, що промивання свердловини без буріння (на початку або наприкінці рейсу) повинно проводитись з обов'язковим обертанням БК (БС).

На відміну від прямої схеми промивки свердловини (випадок, коли ПР насосом подається до вибою свердловини через БК, а виходить на поверхню по кільцевому зазору між зовнішньою поверхнею БТ і стінками свердловини), при

зворотному промиванні ПР подається в свердловину через відповідний кільцевий зазор (між БК і породними стінками свердловини), а піднімається до поверхні по внутрішньому каналу БК (базовий принцип технології спорудження свердловин з гідро- або пневмотранспортом керна та шламу) [89]. Загалом, зворотна промивка, застосовувана здебільшого при розвідувальному колонковому бурінні, забезпечує поліпшення умов очистки вибою при менших витратах ПР, сприяє підвищенню виходу керна, а також дозволяє здійснювати безперервне транспортування керна ГП на поверхню в міру поглиблення свердловини. Зазначена схема потребує обов'язкової герметизації гирла свердловини та не може бути застосована за наявності тріщинуватих ГП в стінках свердловини, схильних до поглинань ПР. Тут можна також вказати на існування способу зворотно-всмоктувальної промивки, за якого ПР самопливом надходить у споруджувану свердловину з відстійника та відсмоктується з колони БТ разом з частинками зруйнованої ГП відцентровим насосом або ерліфтом.

Окреслена раніше технологія буріння з гідро- та пневмотранспортом продуктів руйнування на поверхню потоком ОА – забезпечується при використанні подвійної концентричної колони БТ, спеціальних вибійних снарядів та конструкцій ПРІ. Досягається вказане наступним чином: ПР або стиснене повітря нагнітаються в зазор між зовнішньою і внутрішньою трубами, захоплюють на вибої шлам або керна і виносять їх на поверхню по центральному каналу.

Широке узагальнення вітчизняного та світового передового досвіду показує, що тільки відповідні технологічні властивості ПР, а також досконала технологія організації процесу промивання у поєднанні з високоефективними ПРІ та основним і допоміжним буровим устаткуванням, дозволяють досягти найвищих техніко-економічних показників при спорудженні свердловин [90].

ПР створюють середовище, в якому протікають основні процеси циклу спорудження свердловин, крім того вони визначають міру використання потенційних можливостей і ресурс бурового устаткування і інструментів.

Вибір промивальної рідини (ПР) є одним із ключових етапів проектування процесу буріння, оскільки саме від її складу, фізико-хімічних властивостей та параметрів циркуляції залежить ефективність роботи бурової системи і стійкість стовбура свердловини.

Підбір ПР здійснюється з урахуванням вимог до умов реалізації вибійних і свердловинних циркуляційних процесів, що визначають гідродинамічний режим руху потоку, характер взаємодії рідини з гірськими породами, а також теплообмінні та стабілізуючі властивості середовища. У процесі вибору враховують такі фактори: геолого-технічні умови буріння – глибина, тиск, температура, тріщинуватість та водонасичення порід; призначення свердловини – розвідувальна, експлуатаційна, інженерно-геологічна тощо; тип бурового інструменту і швидкість його роботи, які визначають інтенсивність руйнування порід і кількість утвореного шламу; вимоги до стабільності стовбура свердловини, щоб уникнути обвалів, розмивання або поглинання ПР; необхідність збереження цілісності керна при бурінні геологорозвідувальних свердловин; екологічні та технологічні обмеження, пов'язані з можливістю утилізації або повторного вико-

ристання ПР. Результатом правильного вибору промивальної рідини є збалансоване протікання вибійних і свердловинних процесів, що забезпечує оптимальне очищення вибою, зниження енерговитрат, стабільність тиску в системі та підвищення загальної швидкості проходки [78].

Для буріння потрібна значна кількість механічної енергії, що витрачається на створення осьового навантаження ПРІ та обертання БК, а також ініціювання циркуляційного руху ПР. Більшість цієї енергії розсіюється у вигляді тепла, яке потрібно видалити, щоб вибійний ПРІ міг надійно функціонувати. За допомогою ПР можна також видалити шлам із простору між елементами озброєння ПРІ, що попереджає утворення на ньому сальників. При обертанні БК утворюється значна кількість тепла, що має розсіюватися поза свердловиною. ПР допомагає охолоджувати БК, поглинаючи тепло і знижуючи його рівень шляхом конвекції та радіації в навколишню атмосферу біля наземних комор. ПР також забезпечує функцію змащення, що зменшує тертя між БК і стінками стовбура свердловини. Ефект змащення зазвичай забезпечується додаванням бентоніту, технічних масел, графіту, різноманітних допоміжних речовин тощо.

Для безпеки ведення бурових робіт необхідно, щоб високі пластові тиски контролювались у свердловині з метою виключення викидів. Це завдання виконує ПР, що забезпечує перевищення гідростатичного тиску над пластовим. Щоб буріння було ефективним, різниця між гідростатичним і пластовим тиском повинна дорівнювати нулю. Насправді для створення надійного захисту від викиду зі свердловини використовується надлишок тиску, який іноді називають тиском, що утримує від сколювання породи; його величина безпосередньо впливає на механічну швидкість буріння. Механічна швидкість буріння зменшується при збільшенні зазначеного вище тиску. При розкритті пластів з аномально високим пластовим тиском (АВПТ), останній стає негативним і відзначається раптовим збільшенням механічної швидкості буріння. Зазвичай такий стан вважається ознакою загрози викиду зі свердловини [91].

Щоб буріння було ефективним, вибурена ГП повинна негайно видалятися. ПР виносить шлам зі свердловини на поверхню, де він відокремлюється від ПР. Отже, ПР повинна мати такі технологічні властивості, які забезпечують відділення шламу на поверхні та рециркуляцію відновленої ПР. Несуча здатність ПР залежить від кількох факторів, серед яких можна виділити швидкість прокачування в кільцевому просторі, пластичну в'язкість, граничну напругу зсуву та швидкість переміщення частинок вибуреної ГП.

Утворення щільної глинистої кірки сприяє підтриманню стійкості. Перепад тиску між гідростатичним тиском ПР і пластовим також сприяє підвищенню стійкості стінок стовбура свердловини. Стійкість стінок свердловини, складених глинистими різницями, в основному, залежить від типу використовуваної ПР. Найкращий спосіб зберегти стійкість стовбура свердловини – зменшити час, протягом якого він залишається не закріпленим ОТ.

У свердловинах заповнених ПР, каротажі проводять за допомогою зонда, який спускають на каротажному кабелі, з метою встановлення наявності і розміру, до прикладу, вуглеводневих зон. Каротажі у відкритому стовбурі прово-

дять для визначення пористості, потужності пластів та їх меж, місцезнаходження пластів з АВПТ і місця буріння інших свердловин. ПР повинна мати такі параметри, які дозволяють отримати каротажні діаграми високої якості.

До продуктів руйнування за буріння свердловин відноситься, серед іншого, буровий шлам, який представляє собою уламки зруйнованих ПРІ гірських порід [92]. Шлам бурових свердловин складений відділеною різними способами від вибою свердловини ГП, а також він може бути додатково збагачений: продуктами повторного подрібнення ГП на вибої та стінках свердловини; продуктами стирання БТ, бурового снаряда та ОТ; частинками глинистих мінералів та інертних обважнювачів – обов'язкових компонентів деяких видів ПР [93].

Через наявність постійного контакту шламу зруйнованих ГП з ПР, він насичується, здебільшого, досить шкідливими компонентами, що використовуються для спрямованої хімічної обробки ПР. У разі розвідувального буріння, за випадку явища стирання корисних мінералів у колонковій трубі, буровий шлам також збагачується цінними компонентами.

Буровий шлам може бути відібраний на поверхні та використаний для визначення літологічних характеристик розрізу свердловини.

На денній поверхні, за глибокого нафтогазового буріння, продукти руйнування акумулюються в спеціальних шламових амбарах, які представляють собою сховище для шламових відходів процесів буріння свердловин. Вказані амбари використовуються також для збирання відпрацьованих ПР, для чого вони обладнуються природним або штучним протифільтраційними екранами.

Вагомий інтерес для теорії і практики проектування режимних параметрів процесу буріння ГП представляють питання, що стосуються гранулометричного складу продуктів руйнування [94]. Значною мірою він є показником швидкості буріння і величини витрат енергії на 1 пройдений метр. За гранулометричним складом продуктів руйнування можна судити про досконалість конструкцій ПРІ і раціональність режимів його роботи. Без урахування гранулометричного складу бурових шламів практично неможлива розробка ефективних (щодо швидкості та енергоємності) способів очищення свердловин, а також точних і зручних у практичному відношенні методів їх розрахунку. Крім того, гранулометричний склад продуктів руйнування, що виходять з гирла свердловини, визначає ефективність роботи шламовідбірних засобів. Питанням вивчення гранулометрії продуктів руйнування за буріння свердловин різного призначення присвячено досить невелике число ґрунтовних наукових праць, а в літературних джерелах містяться про них тільки уривчасті відомості.

Відповідно до існуючих нині прийомів та методів визначення гранулометричного складу (відсотковий вміст різних за величиною зерен або їхньої кількості), зокрема продуктів руйнування за буріння свердловин, порівняно розповсюдженим з них є ситовий аналіз. Означений метод узагальнено полягає у визначення відсоткового вмісту окремих фракцій продуктів руйнування (бурового шламу ГП), що складаються з частинок певного розміру.

Ситовий аналіз може бути здійснений просіюванням деякої навіски матеріалу через набір стандартних сит (рис. 3.7), що відрізняються розміром отворів

(круглої, щілинної, трикутної, або прямокутної форм) [95]. Проведення ситового аналізу полягає в наступному: відповідна умовам дослідження навіска бурового шламу, яка містить частинки ГП різних розмірів, пропускається через набір сит; останні встановлено одне над іншим у порядку зменшення розмірів отворів зверху донизу. В результаті послідовного просіювання на кожному з сит затримуються саме ті частинки шламу ГП, розміри яких більші за розмір отворів цього сита, але менші за розмір отворів верхнього сита. Для проведення, порівняно, прецензійних досліджень застосовують не менше 5 і не більше 20 сит, а кількість фракцій завжди на одиницю більша за кількість сит. Ситовий аналіз може проводитися вручну або механізовано (за допомогою спеціального ситового класифікатора), а також сухим або мокрим способами, залежно від розмірів та властивостей шламу ГП і заданої точності аналізу.

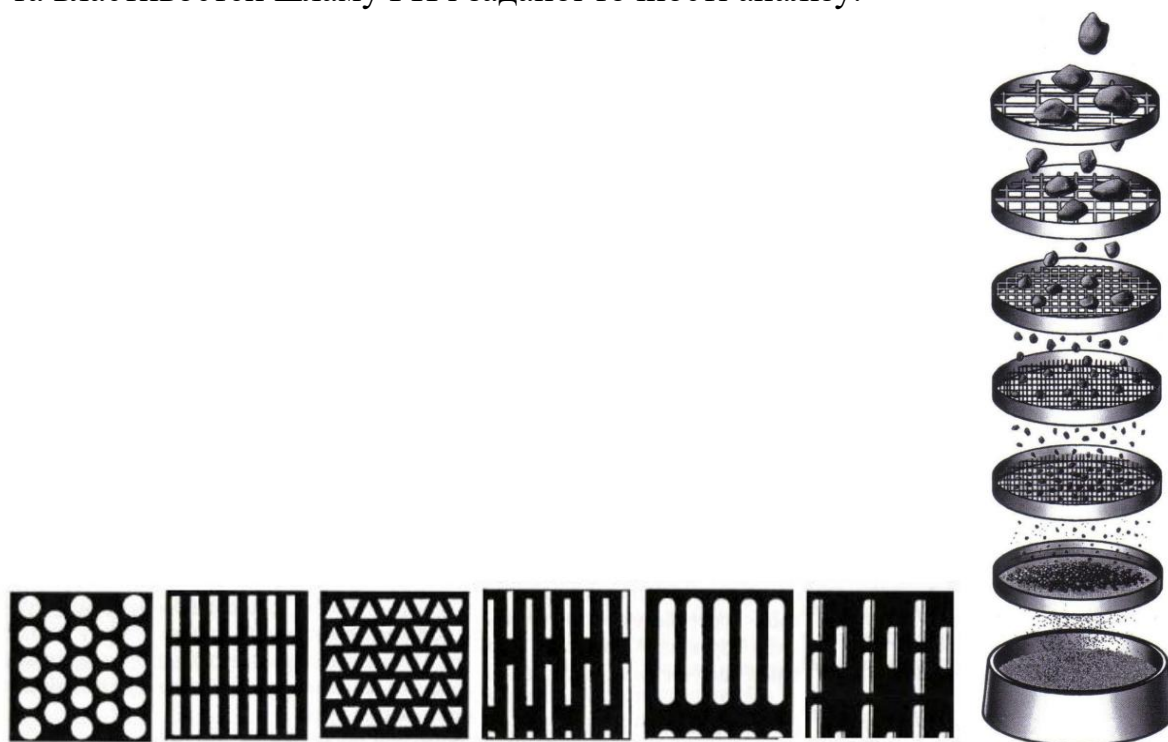


Рис. 3.7. Пояснювальна схема проведення ситового аналізу шламу ГП

Переконливо доведено наступне: розміри частинок бурового шламу ГП розподіляються за логарифмічно нормальним законом А.М. Колмогорова; ним теоретичним шляхом обґрунтовано, що при дробленні отримувані розміри частинок повинні відповідати логарифмічно нормальному закону, а сам закон отримав досить детальну експериментальну перевірку у геологів (на природно роздроблених матеріалах) і збагачувачів (при дробленні на різних млинах).

Не викликає жодного сумніву, що для розробки раціональної програми, в тому числі, гідравлічного очищення свердловин і методів її розрахунку необхідно знати фракційний склад продуктів руйнування ГП не тільки на вибої споруджуваної свердловини, але і на гирлі свердловини (залежно від характеру геологічного розрізу, конструкції і глибини свердловини та інших факторів, їх гранулометричні характеристики можуть сильно розрізнятися).

В результаті проведених досліджень гранулометричного складу шламу ГП встановлено, що за обертального буріння є найбільша ймовірність зустрічі частинок з розміром від 1 до 15 мкм, а при ударно-обертальному – від 5 до 40 мкм (залежить це від типу коронки). Вказані експериментальні дослідження дозволили також проаналізувати вплив низки факторів технологічного режиму буріння на дисперсійний склад бурового шламу деяких ГП.

Був підданий дослідженню також механізм впливу складу і властивостей ГП на дисперсійний склад продуктів руйнування при бурінні дрібноалмазним ПРІ [96]. В якості випробовуваних зразків ГП, за дослідного буріння, були прийняті такі характерні їх представники (рис. 3.8): роговик (являє собою тонкозернисту або приховано-кристалічну контактово-метаморфічну ГП; формується за нагріву глинистих та інших тонкозернистих алюмосилікатних порід, які знаходяться в контакті з магматичними тілами, на глибинах до 10 км; загалом складається з кварцу, слюди, гранатів та характеризуються, зазвичай, високими міцнісними властивостями), мармур (карбонатна зерниста метаморфічна ГП, яка утворилася шляхом перекристалізації вапняку або доломіту; складається, здебільшого, з кальциту, в деяких випадках з домішками доломіту; дрібнокристалічний різновид мармуру відрізняється найвищим ступенем міцності), пісковик (типова осадова ГП, складена з зерен піску, зцементованого глинистим, кременистим та іншим матеріалом; виділяють кварцові, кварцово-польовошпатові, кварцово-глауконітові, гіпсоносні, вапнисті, глинисті тощо пісковики) [97].



Рис. 3.8. Випробовувані за дослідного буріння зразки ГП: роговик (а), мармур (б), пісковик (в)

Досліджений роговик (представлений кварцом і польовим шпатом – до 75%, решта – актиноліт і хлорит), мав щільну, масивну, однорідну мікропрожилкову текстуру і дрібнозернисту, розмірноюзернисту структуру; за твердістю його можна віднести до X - XI категорії однойменної класифікації.

Сульфідизований мармур являв собою ГП, представлену більш м'якими мінералами: кальцитом (75%), біотитом (18%), піритом (10%), епідотом (решта); володів масивною, щільною однорідною текстурою і порфіробластовою структурою; за твердістю його можна було віднести до VI категорії.

Випробуваний на руйнування дрібноалмазним ПРІ пісковик, мав масивну будову, слоїстий, дрібнозернистий з частинками слюди і сильно зруйнованим польовим шпатом (віднесено до VII категорії за твердістю) [2].

Вдалося з'ясувати та підтвердити наступне практичне положення: за обертального буріння дрібноалмазним ПРІ будова і властивості ГП майже не позначаються на геометричних параметрах бурового шламу.

Вплив зернистості алмазів ПРІ на гранулометричний склад продуктів руйнування вивчався при обертальному і ударно-обертальному способах буріння інструментом, армованим природними і штучними алмазами. Порівнюючи параметри шламу, отриманого при бурінні природними і штучними алмазами, було виявлено, що при бурінні штучними алмазами ймовірні розміри частинок продуктів руйнування в 2 - 5 разів більше, ніж при бурінні ПРІ, армованим природними алмазами. Діапазон варіювання розмірів частинок бурового шламу ГП був доволі незначним. При бурінні обертальним способом розмір частинок доходив до 2 мм, а при ударно-обертальному – до 3 мм.

Вплив динамічних навантажень на дисперсійний склад бурового шламу ГП був простежений на прикладі поліміктового пісковика. Буровий шлам вказаної ГП було отримано при бурінні алмазним ПРІ. За обертального буріння, кількість частинок шламу розміром до 0,005 мм, становить 15 - 25%, а ударно-обертального – від 4 до 13%; в той же час при ударно-обертальному бурінні значно збільшується вихід великих частинок. Так, при обертальному бурінні частинок крупніше 0,1 мм 4 - 5%, а при ударно-обертальному – від 13 до 16%. В цілому при бурінні ПРІ з природними алмазами, при накладенні динамічних навантажень, вихід кількості великих частинок значно збільшується [98].

Вплив інтенсивності очищення на розміри частинок бурового шламу ГП вивчався при бурінні пісковиків (P_1 і P_2) обертальним способом, що відрізнялися між собою фізико-механічними властивостями. Обидві ГП бурилися при постійних режимах, корегувалася тільки інтенсивність очищення вибою. Твердість пісковика P_1 в 1,5 рази була вищою, ніж у P_2 . У той же час коефіцієнт пластичності пісковика P_2 був у 2 рази вище, ніж для P_1 . Абразивність і динамічна міцність обох пісковиків була приблизно однаковою.

Незважаючи на відчутні відмінності в механічних властивостях досліджуваних пісковиків і значні варіювання інтенсивності промивання вибою, результат дисперсійного поділу шламу в якісному відношенні виявився одним і тим же. Відмінність носив лише якісний характер. При бурінні з більш інтенсивною промивкою вихід дрібних фракцій зменшився, а великих – збільшився. Розбіжність особливо значна для великих фракцій і менш значна – для дрібних. Це вказує на вторинне подрібнення продуктів руйнування при слабкій промивці.

Вплив частоти обертання на дисперсійний склад продуктів руйнування ГП виявився таким: зі збільшенням частоти обертання (при постійній інтенсивності промивання вибою) вихід дрібних фракцій бурового шламу зростає, а великих – зменшується. Однак ця тенденція не є занадто значною.

Величина зусилля подачі ПРІ на дисперсійному складі продуктів руйнування відбивається в наступний спосіб: збільшення зусилля подачі призводить

до скорочення дрібних і збільшення великих фракцій. Зауважимо, що зусилля подачі на розміри шламових частинок має більший вплив, ніж частота обертання; вказана тенденція чіткіше виражена для твердих ГП.

Зміна величини механічної швидкості буріння (за рахунок одночасного корегування зусилля подачі і частоти обертання) також позначається на дисперсійному складі продуктів руйнування. Збільшення механічної швидкості буріння приводить до значного скорочення дрібних фракцій і збільшення великих. Так, найбільш вірогідний діаметр частинок шламу збільшився з 6,9 до 12,3 мкм, а дрібних частинок з діаметром до 5 мкм знизився з 42 до 23%.

Було виконано також промислове дослідження результатів реалізації операцій з руйнування вибою свердловин (при різноманітних поєднаннях ПРБ) на прикладі аналізу гранулометричного складу шламу ГП. В якості ПРІ виступали бурові коронки діаметрами 85 і 118 мм [2]. Витрата ПР (глинистого розчину), що подавався на вибій, коливалася в межах 2,5 - 18 л/с. Навантаження змінювалося в межах 800 - 2200 даН, а число оборотів 146 - 241 хв⁻¹. На підставі отриманих даних були побудовані графіки залежності фракційного складу (Ф) від діаметра вибурених частинок при різних поєднаннях режимних параметрів (рис. 3.9).

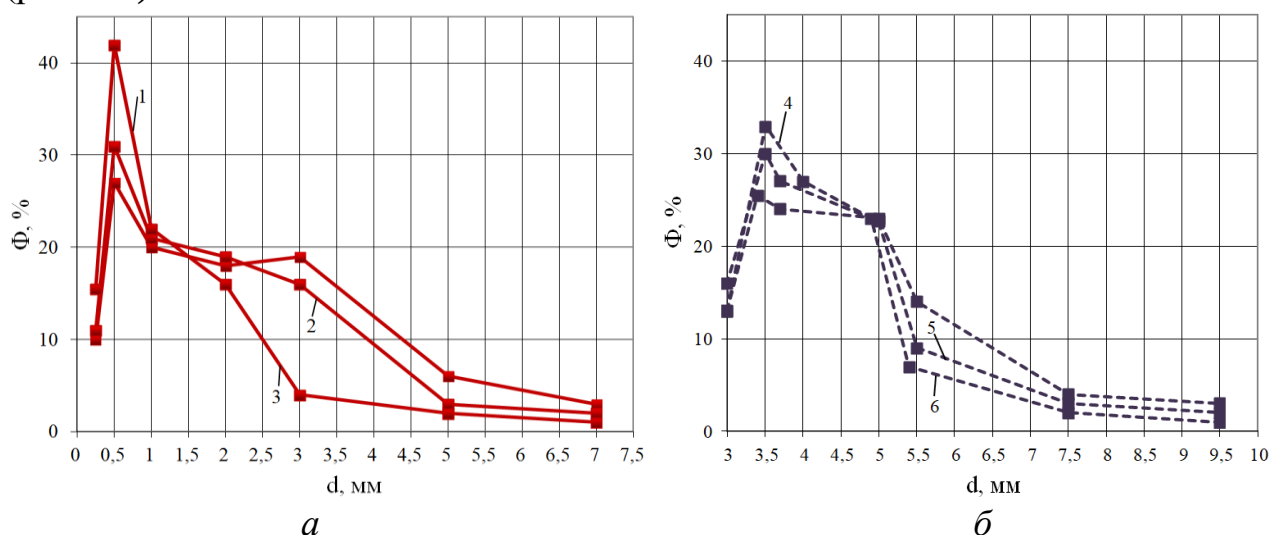


Рис. 3.9. Графік залежності фракційного складу шламу ГП від діаметра вибурених частинок: а – при бурінні коронкою з діаметром 85 мм (1 – при навантаженні 1200 даН; 2 – 1100 даН; 3 – 825 даН); б – при бурінні коронкою з діаметром 118 мм (1 – при навантаженні 1350 даН; 2 – 1175 даН; 3 – 1100 даН)

Узагальнюючий аналіз даних рис. 2.3 дає підстави стверджувати наступне: з усіх фракцій, максимальною за відсотковим вмістом, є така із розміром у 0,5 мм. Вказана фракція, з максимальним значенням для всіх кривих, які ілюструють залежність фракційного складу від діаметру при певному навантаженні, зменшує своє абсолютне значення зі зростанням осьового навантаження. Так, для коронки діаметром 85 мм, за підвищення осьового навантаження, вона зменшується з 42 до 35%. Зменшується також і фракція з розміром частинок в 0,25 мм; решта фракцій – збільшуються (наведемо такий приклад: при навантаженні

в 825 даН фракція з розміром 3 мм становить 4%, в той час, як при навантаженні 1100 даН вона дорівнює 15,5%, а при 1200 даН – 19%). Таким чином, зі збільшенням діаметру частинок процентний вміст фракції зростає до певної межі (до 0,5 мм), а потім знижується; зі збільшенням осьового навантаження процентний вміст фракцій в 0,25 і 0,5 мм зменшується, а решта фракцій – зростає.

Доволі вичерпні дані про гранулометричний склад продуктів руйнування ГП зібрані для умов шарошкового інструменту. Зокрема встановлено, що за руйнування гірських порід різні вінці шарошок ПРІ утворюють різний шлам. Аналіз отриманих даних показав, що при здійсненні досконалої очистки вибою споруджуваних свердловин та об'ємному руйнуванні ГП, найбільшою за вмістом (10 - 22%) є фракція, представлена частинками шламу з розмірами 3 - 5 мм. Вміст частинок розмірами від 7 до 10 мм становить 5 - 10%. Частинок шламу з розміром більше 10 мм в буровому шламі менше 6%. Безумовно, вказані дані орієнтовні і повинні уточнюватися в міру удосконалення шламового аналізу.

Безпосереднім моделюванням та певними аналітичними розрахунками показано, що форма і розмір частинок шламу є відправним пунктом при розробці складових регламенту промивання свердловини (іншими словами гідравлічної програми) [99]. Проте належну увагу вказаному питанню стали приділяти лише останнім часом. Деякими дослідниками вважається, що частинки шламу ГП мають пластинчасту форму; інші стверджують існування продуктів руйнування вибою свердловини у вигляді різних багатогранників; мають місце свідчення і про те, що шлам ГП являє собою частинки подовженої двоопуклої форми; в цілому форма частинок досить різна, проте її завжди в якійсь мірі можна уподібнити до певної геометричної фігури. Таким чином, резюмувати можна наступне: до теперішнього часу немає єдиної методики для встановлення визначальних параметрів форми частинок бурового шламу.

Дослідник К. Вільямс вважає можливим [100], при розрахунках швидкостей осідання частинок шламу ГП, враховувати їх форму за допомогою параметра δ , який характеризує ступень сплюснутості частинок і визначається так

$$\delta = \frac{t}{d}, \quad (3.8)$$

де t – товщина частинки шламу ГП; d – діаметр вказаної частинки.

Потрібно зауважити: в якості параметра d (назвати його можна також еквівалентним діаметром максимального міделевого перерізу) необхідно приймати максимальний діаметр кола, описаного біля частинки шламу ГП, а в якості t – товщину частинки ГП, заміряну по нормалі до площини вказаного кола. Величина δ може змінюватися в широких межах: від величин, близьких до одиниці для частинок шламу ГП об'ємної багатогранної форми, до значень, близьких до нуля у випадку частинок шламу ГП пластинчастої форми.

Наведемо такий приклад [2]: спеціальними дослідженнями було доведено, що у випадку застосування твердосплавного ПРІ, основна маса ГП, яка знаходиться попереду різця коронки (з величиною його заглиблення в 1,0; 1,5; 2,0 мм), відокремлюється порівняно великими елементами пластинчастої форми. Вказана форма продуктів руйнування мала місце за всіх величин заглиблення

різця, причому крупність пластинок зростала зі збільшенням його заглиблення в ГП. Співвідношення сторін пластинок коливалося в межах 1:3:6 - 1:4:10. Дійсно частинки шламу при твердосплавному бурінні мають форму пластини, у якої один вимір значно більше двох інших. Шлам свердловин алмазного і шарошкового буріння також характеризується великою різноманітністю форм.

3.2 Розгляд окремих питань раціоналізації алгоритму проектування режимів циркуляційних процесів при спорудженні свердловин різного призначення

Промивальні рідини, ОА, є багатокомпонентними системами, що застосовуються під час буріння свердловин різного призначення, зокрема на нафту і газ; вони виконують низку важливих функцій: очищують вибій від шламу, охолоджують і змащують буровий інструмент (ПРІ), стабілізують стінки свердловини, запобігають викидам пластових флюїдів і забезпечують передачу енергії на вибійні компонування. Якість процесу буріння значною мірою залежить від фізико-хімічних властивостей ПР, які визначають її ефективність у різних умовах. Основними характеристиками ПР є густина, в'язкість, тиксотропність, фільтраційні властивості, змащувальна здатність, стабільність і реологічні параметри. Густина визначає тиск стовпа рідини на стінки свердловини, від якого залежить стійкість ГП і запобігання викидам. Якщо густина надмірна, швидкість буріння знижується через збільшення тиску на породний вибій свердловини; якщо ж вона недостатня, можливі обвали стінок свердловини або прориви пластових флюїдів. В'язкість впливає на здатність ПР переносити вибурені частинки на поверхню. Занадто висока в'язкість призводить до підвищення гідравлічних втрат, а занадто низька – до неефективного очищення вибою та стовбуру свердловини. Тиксотропні властивості забезпечують утворення гелю у стані спокою, що запобігає осіданню частинок шламу. Від фільтраційних властивостей залежить кількість фільтрату, який проникає в породу: надмірна фільтрація може викликати зниження проникності пластів, а також прилипання бурильного інструменту. Змащувальна здатність рідини впливає на зменшення тертя між колоною труб і стінками свердловини, що знижує крутний момент і знос інструменту. Стабільність бурового розчину характеризує його стійкість до розшарування та зміни властивостей під впливом високих температур і тисків. Реологічні властивості визначають поведінку рідини під час руху, що важливо для ефективної циркуляції в системі буріння. Раціоналізація властивостей ПР досягається шляхом регулювання їх складу – введенням бентоніту, полімерів, бариту, солей, а також інгібуючих, емульгуючих і поверхнево-активних добавок. Контроль температури, рН і іонного складу дозволяє підтримувати стабільність ПР в процесі буріння. Правильно підібрана ПР забезпечує високу швидкість буріння, знижує зношування обладнання та запобігає аварійним ситуаціям. Таким чином, властивості ПР мають вирішальний вплив на ефективність, безпеку й економічність процесу буріння свердловин [24].

Процес буріння свердловин різного призначення складається з ряду послідовно виконуваних операцій [71]; безпосередньо тими, які сприяють отриманню названої специфічної виробки в породному масиві виступають: руйнування гірської породи спеціальним інструментом та видалення зруйнованої породи на поверхню за допомогою, здебільшого, промивальних рідин із індивідуальними фізичними і хімічними властивостями [78].

Перед промивальними рідинами стоїть завдання виконання значної кількості функцій, які не зводяться лише до необхідності видалення продуктів руйнування гірського масиву. За рахунок науково-обґрунтованого розгляду всіх особливостей циркуляційних процесів у споруджуваній бурінням свердловині, можна побачити велику кількість можливих аспектів прояву позитивного впливу промивальних рідин на хід і результативність окремих сторін комплексного процесу спорудження свердловин.

Промивальні рідини, як речовини, що здатні до плинності та мають змогу змінювати свої фізико-хімічні властивості під впливом різних фізичних і хімічних полів, можуть бути з успіхом адаптовані до різноманітних потреб, виконанням яких досягаються деякі суттєві покращення процесів буріння [64].

Оскільки промивальні рідини представляють собою не тільки циркуляційне середовище, яке забезпечує певного виду гідростатичну або гідродинамічну взаємодію зі стінками свердловини та буровим шламом; вони також активно впливають, наприклад, на механізм руйнування гірської породи на вибої свердловини, саме тому необхідно чітко представляти критерії такої взаємодії та шляхи її можливого регулювання в потрібному напрямку.

Для вірного розуміння внутрішньо-свердловинних процесів, які мають місце при циркуляції промивальної рідини, необхідно мати вичерпну інформацію про всі складові кожного самостійного їх циклу та вірно орієнтуватися в причинно-наслідкових зв'язках між ними.

Спрямована спеціальна обробка промивальних рідин (з метою регулювання їх деяких властивостей, або надання останніх як таких) істотно розширює можливі області застосування даного класу циркуляційних середовищ. Все означене висуває на перший план необхідність глибокого аналізу передумов побудови програми обробки промивальних рідин та наступного коректного їх використання в практиці.

Технологія застосування ПР пройшла довгий шлях від простого застосування технічної води, яка в процесі циркуляції в свердловині збагачувалася частинками зруйнованої породи [54], що надавали їй певних властивостей, до полімерних та інших подібних систем. Все це супроводжувалось проведенням різних за наукової глибиною та масштабами розкриття взаємозв'язків дослідженнями аналітично-лабораторного та промислового характеру. Найбільша кількість дослідницьких робіт в галузі проектування і застосування промивальних рідин присвячена групі глинистих розчинів, які являються найбільш розповсюдженими речовинами, що забезпечують супроводження циркуляційних процесів буріння свердловин; основною особливістю вказаних рідин є здатність утворювати на стінках стовбура свердловини так звану глинисту кірку (віднос-

но тонкий шар ущільненого глинистого розчину, вибурених уламків гірської породи та самих глинистих частинок). Переконливо доведено, що глиниста кірка, як така, забезпечує суттєве зменшення проникності стінок стовбура свердловини, сприяє підвищенню міри зв'язності слабозцементованих гірських порід, знижує силу тертя бурильних та обсадних труб об стінки свердловини.

Основні властивості глинистих промивальних рідин залежать від якості глинистих порошків, що слугують їх дисперсною фазою, та характеристиками застосовуваних хімічних реагентів-регуляторів [24].

Досить багато досліджень було проведено в напрямку з'ясування механізму впливу технологічних властивостей промивальних рідин на фактор збереження стійкості стінок стовбура свердловини; необхідність забезпечення гідродинамічної рівноваги в системі «свердловина - пласт гірської породи»; працездатність застосовуваного породоруйнівного інструменту, гідравлічних та електричних вибійних двигунів, бурильних і обсадних труб та іншого основного і допоміжного свердловинного бурового обладнання.

Останнім часом спостерігається стійка тенденція підвищення практичного інтересу до питань можливості ефективного застосування промивальних рідин із підвищеними змащувальними властивостями, зниженим вмістом твердої фази, а також газорідних систем для відповідних умов [101].

Досить велике різноманіття геолого-технічних особливостей спорудження свердловини та виконуваних ними функцій і завдань, інтенсивний розвиток техніки та технології буріння, значний прогрес хімічного виробництва, підвищення вимог щодо економічної складової бурових робіт, а також суворі обмеження відносно проблематики охорони довкілля це лише невеликий перелік питань, що ставляться перед розглядуваною галуззю в ракурсі необхідності постійного удосконалення рецептур промивальних рідин та їх основних технологічних властивостей.

Досвід спорудження свердловин дозволив сформулювати декілька необхідних вимог до властивостей ПР, визначуваних їх функціями, а саме вони повинні: ефективно очищати вибій та стовбур свердловини від частинок розбурюваних порід і видаляти їх на денну поверхню; утримувати частинки породи в завислому стані і запобігати їх осадженню на вибій споруджуваної свердловини; створювати достатній гідростатичний тиск для попередження проявів флюїдів та їх фонтанування; охолоджувати вибійний інструмент під час його роботи; забезпечувати стійкість стінок стовбура свердловини; утворювати на стінках свердловини фільтраційну кірку; забезпечувати змащування бурового інструменту; передавати гідравлічну потужність відповідному вибійному обладнанню; виконувати роль каналу зв'язку із вибоєм свердловини.

Для якнайповнішого виконання свого функціонального призначення, промивальні рідини повинні володіти відповідними фізико-хімічними властивостями, до основних з яких відноситься: густина, в'язкість, водовіддача, липкість, плинність, змащувальні властивості, гідравлічний опір, здатність проникнення в продуктивні пласти, міра вспінення та запусіння та ряд ін.), перелічене потребує спеціальних методів і прийомів приготування та спрямованої обробки рі-

дин відповідними хімічними реагентами, підбір яких проводиться не тільки для кожної конкретної свердловини із певними геолого-технічними умовами, а навіть для окремих інтервалів буріння.

Все перераховане вимагає від інженерів-практиків та дослідників науково-обґрунтованого підходу до питань розробки рецептур промивальних рідин та їх адаптації до конкретних свердловинних умов [81].

Для того, щоб більш ясно уявляти собі картину тих явищ, які мають місце під час реалізації процесів промивання бурових свердловин, необхідно уважно прослідкувати за ходом реалізації функцій промивальної рідини. Приготована промивальна рідина буровими насосами подається до циркуляційного контуру, найбільш протяжною ланкою якого є колона бурильних труб. Раціоналізація цього етапу процесу промивання може бути досягнута за рахунок зменшення коефіцієнту опору при русі рідини по внутрішньому каналу БК.

Суттєвість ефекту зменшення гідравлічних опорів, за циркуляції рідини трубопроводом – при додаванні до останньої деяких добавок, була помічена достатньо давно. Проте на достатньому науковому рівні вказане було обґрунтовано Б. Томсом, та отримало назву ефект Томса (англ. Toms effect), який полягає в наступному: зменшення втрат тиску при турбулентному режимі руху води і розчинів на основі останньої, може бути досягнуто при введенні до перелічених речовин в дуже малих концентраціях деяких полімерів. На фізичному рівні ефект Томса пояснюється так: при русі турбулентного потоку рідини – із активними добавками – вздовж твердої поверхні стінки труби створюється структурований, не порушений потоком рідини шар, що гасить турбулентність і перешкоджає відриву прикордонного шару від стінки. Молекули розчиненого в рідині полімеру (час релаксації яких збігається з масштабами турбулентних вихорів) гасять вихори, а також перешкоджають генеруванню нових, що дозволяє значно зменшити інтенсивність поперечних пульсацій, а тим самим скоротити втрати тиску на тертя. Встановлено, що полімерні добавки знижують гідравлічні опори, але рівень ефекту залежить від типу полімеру і значення критерію Рейнольдса, який характеризує режим течії.

Для додаткового уточнення деяких особливостей режиму руху промивальних рідин в циркуляційному контурі бурової свердловини, на кафедрі нафтогазової інженерії та буріння НТУ «Дніпровська політехніка» були проведені спеціальні дослідження щодо вивчення впливу різних добавок на явище зниження гідравлічних опорів при русі рідини трубопроводом на лабораторній установці (рис. 3.10). Відповідно до технологічної схеми стендової установки, вона в свій состав включала мірний бак, з якого досліджувану рідину насосом подавали в допоміжну ємність, звідки вона надходила в експериментальний трубопровід, що на своїх кінцях мав ділянки стабілізації, рівні за довжиною 50 діаметрам самого циркуляційного трубопроводу. При роботі з відцентровим насосом із системи виключали допоміжну ємність, при цьому рідину, що досліджується, з бака подавали безпосередньо у вимірювальну ділянку. Перепад тиску на робочій ділянці труби вимірювали двома манометрами, а витрату визначали за допомогою мірного циліндра. Регулювання витрати в системі здійснювали вентилем.

Під час проведення досліджень застосовували таку методику. Попередньо готували розчин досить розповсюдженої хімічної сполуки-полімеру ПАА (загалом це ряд полімерів на основі акриламідів та його похідних) та йому подібних хімічно активних речовин 10% концентрації, який потім розбавляли, заливали в бак і ретельно перемішували. Перед початком проведення вимірювань і наприкінці відбирали необхідну пробу розчину для визначення його умовної в'язкості [24].

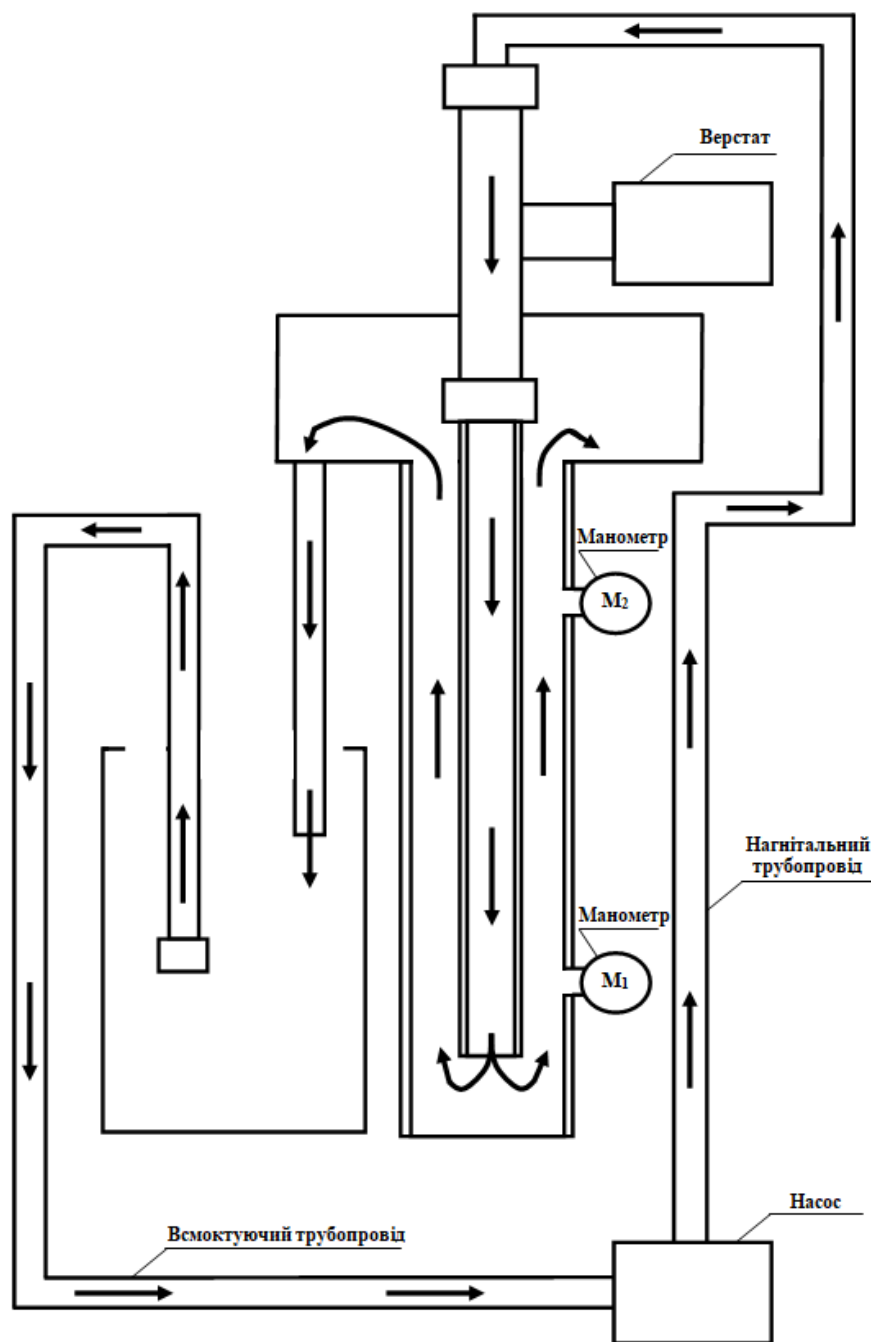


Рис. 3.10. Схема спеціальної стендової установки для визначення гідравлічних характеристик циркуляційного контуру бурової свердловини

Після включення насоса, в системі дослідницького гідравлічного стенду, в трубопроводі, за допомогою вентиля, встановлювали певну витрату, потім приступали безпосередньо до вимірювань, в процесі яких фіксували значення пе-

репаду тиску і витрату рідини. Дослідження проводили при різних значеннях витрати та концентрації активних речовин. Для кожного окремого випадку вимірювання, за постійної температури, повторювали не менше трьох разів і визначали середні величини. Після кожного проведеного дослідження трубу промивали та перевіряли її чистоту. Оцінку впливу активних речовин на показники величини гідравлічного опору при циркуляції досліджуваної рідини трубопроводом проводили за значенням коефіцієнта опору, який розраховували на підставі отриманих експериментальних даних, шляхом застосування відомого виразу Дарсі-Вейсбаха [86] для визначення перепаду тиску

$$\Delta P = \lambda \frac{\gamma \cdot v^2}{2 \cdot g} \cdot \frac{l}{d}, \quad (3.8)$$

звідки

$$\lambda = \frac{2 \cdot g \cdot \Delta P \cdot d}{l \cdot v^2 \cdot \gamma}, \quad (3.9)$$

де ΔP – перепад тиску в досліджуваному трубопроводі; g – прискорення сили тяжіння; l – довжина вимірювальної ділянки трубопроводу; v – середня швидкість руху потоку рідини в трубопроводі; d – діаметр труби досліджуваної ланки трубопроводу; γ – питома вага досліджуваної рідини.

Таблиця 3.1.

Характер впливу активних речовин на ефект зниження гідравлічних опорів при циркуляції досліджуваних рідин по трубопроводу

№ з/п	Розчинник	Активна речовина		Коефіцієнт гідравлічного опору при циркуляції досліджуваної рідини λ	Ефективність, %
		Назва	Концентрація, %		
1	Вода	-	-	0,031	0
2		ПАА	0,01	0,027	13
3			0,05	0,017	45
4			0,1	0,015	51
5			0,005	0,015	51
6		Поліоксиетилен	0,01	0,015	51
7			0,01	0,030	3
8		Поліакрилонітрил	0,05	0,027	13
9			0,1	0,026	16
10			0,5	0,020	35
11			0,5	0,031	0
12		Сульфатне мило	1,0	0,027	13
13			2,0	0,027	13
14		ПАА + сульфатне мило	0,05 + 0,5	0,015	51
15		Поліакриламід + талове масло + ОП-10	0,05 + 0,5 + 0,25	0,015	51
16		Диталан + NaCl	0,5 + 5	0,018	42
17		Метаупон	0,5	0,024	22

Так звана ефективність, отримувана від застосування активних речовин для прояву ефекту зниження гідравлічних опорів, визначалась за формулою

$$E = \frac{\lambda_g - \lambda_{AP}}{\lambda_g} \cdot 100\%, \quad (3.10)$$

де λ_g и λ_{AP} – числові значення коефіцієнтів гідравлічного опору при циркуляції технічної води та водного розчину активної речовини відповідно.

Результати проведених експериментальних досліджень (табл. 3.1) беззаперечно свідчать, що найбільше зниження гідравлічних опорів може бути одержано при застосуванні ПАА із деякими добавками та поліоксietiлену, ефективність зниження гідравлічних опорів для яких сягає більш 50%.

Наочна графічна демонстрація результативності E від застосування деяких активних речовин та їх сумішей для зниження гідравлічних опорів в циркуляційній системі (визначена за формулою 3.3), представлена на рис. 3.11.

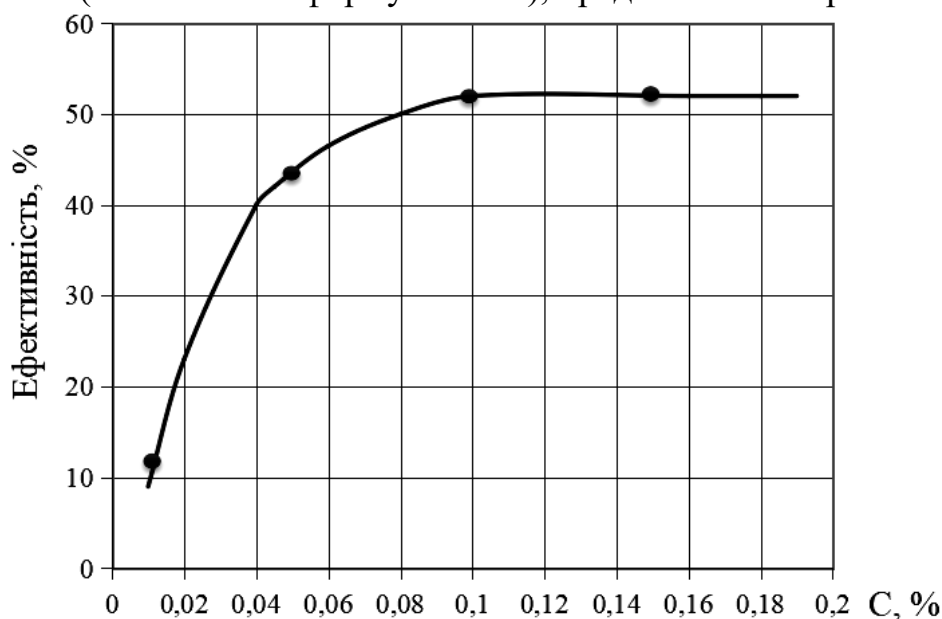


Рис. 3.11. Деяка усереднена залежність ефективності зниження гідравлічного опору E (%) при циркуляції активованих рідин від концентрації активних речовин C (%)

Аналізуючи дані рис. 3.11, можна побачити наступну якісну залежність: найбільший вплив на ефект зниження гідравлічних опорів чинять активні речовини при їх концентрації в розчині до 0,1; при подальшому зростанні показника C ефект впливу стабілізується та залишається майже незмінним.

В результаті проведених експериментальних досліджень також вдалось встановити, що введення до складу рідин, наприклад, поліакриламід, в оптимальних концентраціях, сприяє деякому покращенню характеристик роботи насоса; останнє проявляється в зниженні витрат потужності.

При проведенні означених досліджень (рис. 3.12) визначали розрідження на вході в насос, тиск на виході з нього, рівень витрачуваної електродвигуном насоса потужності та витрату рідини. Дані вказаного рисунку свідчать про комплексність впливу активних речовин (на прикладі ПАА) на перебіг циркуляційних процесів в гідравлічному контурі та дозволяють констатувати можливість

застосування полімерних речовин для стабілізації показників енергетичної ефективності роботи експлуатованих бурових насосів.

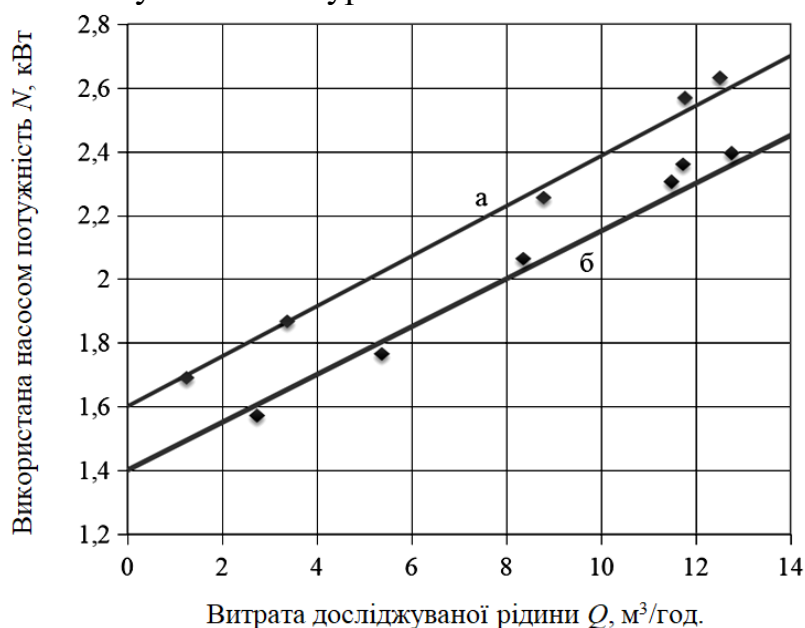


Рис. 3.12. Характеристична залежність рівня витрачуваної насосом потужності від витрати рідини: а – вода; б – вода з добавкою 0,05% ПАА

У процесі проведення розглядуваних лабораторних досліджень було також встановлено здатність полімерів поступово втрачати ефективність у результаті деструкції молекул [102]. Загалом деструкцію можна визначити як явище, що супроводжується розривом хімічних зв'язків головного ланцюга макромолекули; залежно від природи факторів, які викликають явище деструкції, розрізняють фізичну та хімічну деструкції; на практиці вказані типи реакцій в полімерах відбуваються одночасно, часто прискорюючи одна одну. Показником наявності в циркуляційній системі явища деструкції можна прийняти ефективність E зниження гідравлічних опорів (рис. 3.13).

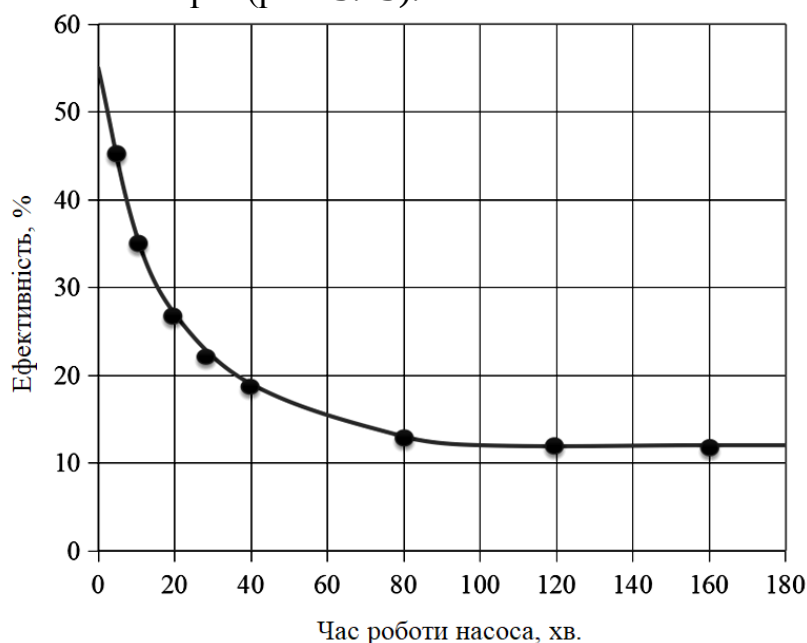


Рис. 3.13. Залежність ефективності дії E речовини ПАА від часу роботи насоса

На прикладі циркуляційних характеристик, визначених для ПАА, можна констатувати наявність для означеного типу полімеру присутності явища деструкції, яке виражається в досить швидкому значному зниженні масштабу впливу розчиненої в промивальній рідині активної речовини на результативність зменшення гідравлічних опорів, що, у свою чергу, потребує проведення додаткових хімічних обробок циркулюючих рідин.

Крім розглянутих факторів, було також з'ясовано притаманність розчинам полімерів явища зменшення гідравлічних опорів (рис. 3.14) при русі рідин поруч з трубами, що обертаються (модель роботи бурильної колони).

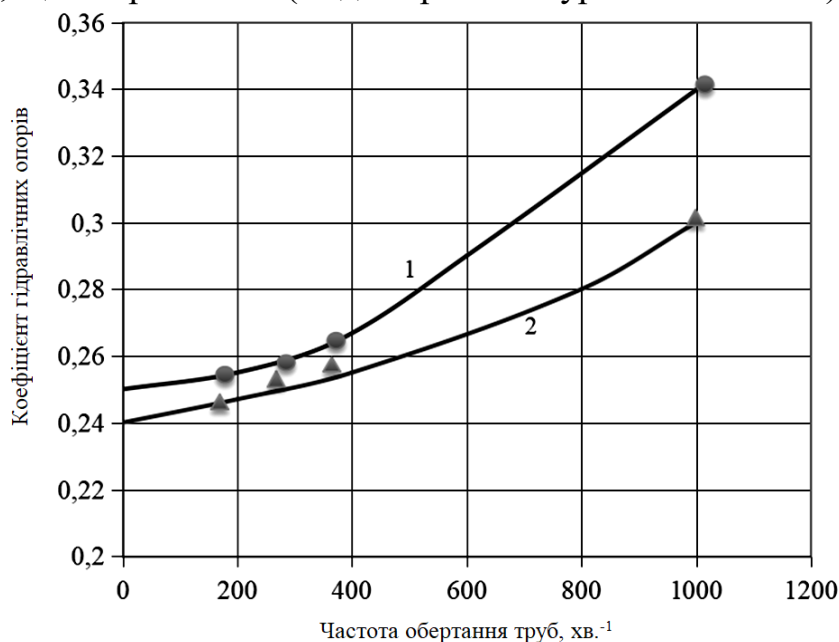


Рис. 3.14. Залежність рівня гідравлічних опорів від частоти обертання колони труб при циркуляції рідини в затрубному просторі: 1 – вода; 2 – 0,5% водний розчин ПАА

Дані рис. 3.14 показово доводять, що із зростанням частоти обертання труб також зростають гідравлічні опори в циркуляційній системі, проте інтенсивність їх росту можна суттєво зменшити шляхом введення до складу застосовуваних рідин активних добавок у вигляді полімерів.

Міра інтенсивності зростання реологічних та структурно-механічних показників застосовуваної промивальної рідини залежить від: об'єму вибурених частинок гірської породи, їх фракційного складу, а також колоїдно-хімічної активності [103]; ступеня очищення промивальної рідини; характеру хімічної обробки та властивостей використаних хімічних реагентів; певний вплив мають інші фізико-хімічні фактори. Відповідно до означеного, раціональне і кероване управління властивостями бурових промивальних рідин це, насамперед, ефективне регулювання: вмісту в них твердої фази і кількісно-якісного складу хімічних реагентів.

Кількість твердої фази в промивальній рідині значно впливає на термін служби і надійність елементів циркуляційної системи [104], її гідродинамічні

характеристики; також істотно помітне явище кореляції означеного параметру із величинами механічної швидкості буріння і терміну стійкості породоруйнівних інструментів (бурових доліт, коронок). За даними провідних дослідників США, зменшення вмісту твердої фази у буровій промивальній рідині навіть на 1% покращує показники роботи доліт, в середньому, на 7 - 10%. Деякими промислово-лабораторними дослідженнями також показано, що при зниженні вмісту твердої фази в промивальній рідині на 42 - 33%, проходка на долото, потенційно, може зрости приблизно в два рази, а механічна швидкість збільшиться. Для умов використання інструменту з алмазним озброєнням, розробка рецептур промивальних рідин повинна передбачати необхідність зниження вмісту (аж до повного виключення) твердої фази з промивальної рідини (в разі технологічної можливості та ефективності здійснення такого прийому). До прикладу, для досягнення найкращих техніко-економічних показників колонкового алмазного буріння та буріння за допомогою снарядів із знімними керноприймачами, пропонується застосовувати промивальні рідини з низьким вмістом твердої фази (від 3 до 7%). Такі розчини також можуть широко рекомендуватися для буріння свердловин на нафту та газ (табл. 3.2).

Таблиця 3.2.

Технологічні властивості бурових промивальних рідин для типового родовища вуглеводнів Дніпровсько-Донецької западини

Тип бурової промивальної рідини	Густина ρ , кг/м ³	В'язкість T , с	Водневий показник рН	Статична напруга зсуву СНЗ θ_1/θ_{10} (за 1 хв./за 10 хв.), дПа	Фільтрація B , см ³ /30хв	Товщина фільтраційної кірки K , мм	Коефіцієнт тертя кірки КТК
Гуматно-натрієвий	1,14	25	8,5	17/39	5,5	0,5	0,048
Полімер-калієвий	1,10	28	9,5	31/59	5	0,5	0,052

Вказані в табл. 3.2 ПР на практиці (для умов глибокого буріння нафти та газу) забезпечать нормальне проходження бурінням пластів глинистих порід. Для таких промивальних рідин зберігається режим циркуляції без порушення цілісності стовбура свердловини та скупчення шламів на його вибої.

Потенційна ефективність застосування промивальних рідин з низьким вмістом твердої фази різко зростає зі зниженням концентрації останньої, і майже повністю зникає, якщо вміст твердої фази перевищує 7 %. Саме через вказане, для певних умов буріння останніми роками було розроблено та впроваджено в практику спорудження свердловин так звані малоглинисті та полімерні промивальні рідини з вмістом твердої фази у вихідному розчині не більше 6 %. Однак застосування таких промивальних рідин виявилось не настільки ефективним, як очікувалося, що продиктовано швидким збагаченням промивальної рідини частинками вибуреної породи. Через наведені обставини легко побачити, що впро-

вадження в широку практику спорудження свердловин сучасних композиційних складів промивальних рідин буде ефективно лише тоді, коли буде вирішено проблему регулювання кількості в них частинок вибуреної породи за проведення операцій очищення та регенерування циркуляційних систем. Таким чином підкреслимо, що очищення промивальної рідини від шламу – це достатньо важливий захід, який дозволяє значною мірою підвищити основні техніко-економічні показники буріння свердловин різних груп.

Застосовувані нині в бурінні для очищення промивальних рідин від шламу системи не завжди задовольняють наведеним вимогам. У зв'язку з означеним, виникає логічне завдання розробки методики очищення промивальних рідин, що забезпечує надійне регулювання кількості в цих рідинах твердої фази.

В останні роки, у зв'язку зі збільшенням середніх глибин споруджуваних свердловин та погіршенням умов буріння, до промивальних рідин пред'являються більш підвищені вимоги, зокрема щодо флотаційної, інгібуючої та масильної здібностей. Для цих умов були частково розроблені та успішно впроваджені промивальні рідини, що частково відповідають зазначеним вимогам (табл. 3.3).

Таблиця 3.3.

Результати аналізу технологічних властивостей бурової промивальної рідини із свердловини для типового родовища вуглеводнів Дніпровсько-Донецької западини

№ з/п	Параметри бурової промивальної рідини	Проектні значення	Заміряні значення показників
1	Густина, кг/м ³	1140	1165
2	Умовна в'язкість, с	25 - 70	48
3	Статична напруга зсуву СНЗ за 1 хв і за 10 хв, дПа (СНЗ-2)	30 - 50/50 - 90	14/29
4	Статична напруга зсуву СНЗ (GEL) через 10с/1хв/10хв, дПа (Ofite 800) при 20 ° С	-	10/19/67
5	Показник фільтрації за 30 хв, см ³	6 - 7	3
6	Показник фільтрації АНІ за 30 хв, см ³	-	3,2
7	Товщина фільтраційної кірки, мм	1,0	«плівка»
8	Коефіцієнт тертя кірки	-	0,0549
9	Водневий показник розчину, рН	8,0 - 10,0	11,4
10	Загальна мінералізація, %	-	6,49
11	Концентрація іонів кальцію, мг/л	-	350
12	Концентрація іонів магнію, мг/л	-	122
13	Вміст колоїдної фази, %	1,9 - 2,4	1,65
14	Концентрація карбонатів CO ₃ ⁻² , мг/л	-	480
15	Концентрація бікарбонатів HCO ₃ ⁻ , мг/л	-	2318
16	Вміст вуглеводневої фази, %	-	7
17	Вміст твердої фази, %	14	11
18	Вміст піску, %	1,0	0,8
19	Вміст хлориду калію, %	3,0 - 4,5	5,5
20	Пластична в'язкість (t °С 20/40/60), мПа·с	-	27/19/16
21	Динамічна напруга зсуву (t °С 20/40/60), дПа	-	91/82/53

Аналіз даних, наведених у табл. 3.3, дозволяє зробити висновок про те, що пропоновані для використання бурові промивальні рідини мають досить високу якість. Такі рідини створюють у свердловині умови усунення поглинань, запобігання обвалів, набухання стінок свердловини, і навіть знижують енерговитрати на обертання бурильної колони.

Подальше розширення області ефективного використання та збільшення об'ємів промислового застосування нових промивальних рідин при бурінні свердловин різного призначення стримується через відсутність надійних методів та засобів для очищення означених дисперсних систем від шламу. Тому основною метою подальших дослідницьких робіт є розробка методики очищення та хімічної обробки промивальних рідин для підвищення техніко-економічних показників буріння свердловин.

Найбільш широке застосування в практиці буріння свердловин різного призначення має очищення в жолобах і відстійниках (розділ дисперсних систем в гравітаційному полі) [24]. Тут процес очищення протікає тим краще, чим більше розміри і щільність частинок, що відділяють, і менше в'язкість промивальної рідини. При цьому на інтенсивність осадження шламу впливають і інші чинники, такі як концентрація твердих частинок, явище коагуляції та ін. Проведені нами ґрунтовні дослідження, а також дослідження інших авторів, свідчать про дуже нестійку роботу, як очисних пристроїв, жалобної системи і відстійників.

Процес видалення твердих частинок з промивальної рідини можна значно прискорити, якщо останній підсилити застосуванням поля відцентрових сил. Для цього, при бурінні свердловин на нафту і газ, використовуються гідроциклони і центрифуги, відцентрове прискорення в яких в сотні разів перевищує прискорення земного тяжіння. Це дозволяє, при високій продуктивності очищення, забезпечити видалення дуже дрібних частинок з розмірами 5 мкм і більше. В результаті, цей метод очищення відносять до тонкого очищення промивальних рідин від твердої фази. Очищення промивальної рідини в таких механічних пристроях як вібросита, забезпечує ефективне очищення тільки від великих частинок розміром 0,2 мм і більше, але як показали наші дослідження, при бурінні свердловин алмазним-твердосплавними інструментами, в основному, утворюється тонкодисперсний шлам двох класів з розміром частинок 80 - 100 мкм і 1 - 10 мкм. Накопичення такого тонкого шламу в промивальній рідині призводить як до зростання густини, так і в'язкості. Для видалення з промивальної рідини цього шламу і відновлення її властивостей розглянуті вище способи непридатні, або недостатньо ефективні. Тому нами розглянуті та досліджені такі нетрадиційні в бурінні методи очищення як фільтрування, обробка розчину в постійному електричному полі, а також осадження частинок за рахунок введення в промивальну рідину реагентів-флокулянтів. Відмітною особливістю цих методів є те, що вони дозволяють очищати промивальну рідину від твердих частинок навіть колоїдного розміру.

Необхідною умовою досягнення потрібних показників очищення промивальних рідин є вирішення низки задач, що формулюються наступними загальними визначеннями. Вміст твердої фази в промивальних рідинах при бурінні свердловин у районах з різним ступенем метаморфізму гірських порід буде суттєво відрізнятися. Фракційний склад твердої фази при бурінні свердловин у різних умовах, буде неоднаковим. Для ефективної раціоналізації систем очищення та регенерації промивальних рідин необхідно мати вичерпну інформацію стосовно очисної здатності застосовуваних жолобних систем та відстійників. Вимоги щодо очисних пристроїв бурових установок, з точки зору їх очисної здатності, повинні бути чітко сформульовані. Перспективними, з позицій видалення тонкодисперсної твердої фази з бурових промивальних рідин, виступають методи електрохімічного очищення; відповідно до сутності яких повинні бути запропоновані спеціалізовані очисні установки та розроблені відповідні рецептури промивальних рідин [83].

Тут важливо наголосити і на екологічних аспектах реалізації гідравлічної програми промивання свердловин. Не дивлячись на наявність на буровій ділянці системи очищення промивальних рідин, повністю закономірним буде утворення значних об'ємів шламу зруйнованих гірських порід, некондиційних промивальних рідин (вони насичені глинистими частинками колоїдальних розмірів, які не можуть бути виділені звичайними засобами очищення), бурових стічних вод тощо.

Задля виділення колоїдальної глини з бурових промивальних рідин необхідно застосовувати спеціальні хімічні реагенти – коагулянти і флокулянти, які є нешкідливими для оточуючого середовища та дозволяють ефективно розділення відпрацьованих очисних агентів на технічну воду і шлам. Причому увесь отриманий шлам повинен бути належним чином утилізований із дотриманням вимог щодо його переведення в інертний стан (шляхом змішування шламу з порошкоподібними поглиначами та отримання мінерального ґрунту).

Сталий розвиток основних галузей промисловості провідних економічно-розвинутих країн неодмінно базується на результатах функціонування видобувної гілки індустріального сектору. В означеному випадку маються на увазі процеси отримання різних корисних копалин, локацією яких виступають земні надра. А в такому випадку нам необхідно передбачати розбудову комплексу підприємств зі створення системного блоку виймання та переробки необхідних для нас компонентів за повного дотримання багатофакторних вимог екологічної безпеки. Певним чином дати уяву про особливості здійснення процесів отримання корисних копалин дозволяють класифікаційні ознаки останніх, сформульовані відносно типу їх агрегатного стану. Тут доречним буде наведення конкретних, гранично показових прикладів. Велику групу корисних копалин складають так звані тверді, класичними представниками яких являються руди чорних та кольорових металів, вугілля, різноманітні хімічні та будівельні речовини та матеріали [12]. Не менш важливими для промисловості та побутових потреб є рідкі корисні копалини, відомі нам як вода, вуглеводневі сполуки, а

саме нафта і газовий конденсат, розчини різного хімічного складу із превалюванням конкретної речовини. Замикають нами ідентифікований інтегральний ряд промислово-необхідних ресурсів газоподібні корисні копалини із їх найяскравішим представником – природним газом та його головним елементом – метаном. Практично кожна з названих копалин потребує для свого отримання з земних надр спеціальних прийомів, сутність яких визначається типом видобутої речовини, глибиною залягання покладу, геологічними умовами розробки родовищ, завданням даного гірничого (геотехнологічного) циклу видобутку та переслідуваної метою. Відповідно до існуючих нині практик, процеси геологічного пошуку, розвідки та видобутку корисних копалин ведуться за допомогою спорудження гірських виробок різних класів, у тому числі бурових свердловин. Залежно від стадії проведення робіт з освоєння родовищ, змінюється також і номенклатура вимог, які ставляться до споруджуваних виробок. Логічно та технологічно послідовним (для великої групи корисних копалин) вважаються принципи проведення пошукових і розвідувальних робіт за допомогою свердловин, а видобувних – із використанням певного комплексу капітальних гірських виробок. Тут важливо підкреслити, що проведення нами означених типів гірських виробок повинно здійснюватися із застосуванням гранично раціональних й екологічно безпечних методів і прийомів, які максимально виключають можливість втрату розроблюваного родовища та забезпечують передумови реалізації процесів комплексного виймання і переробки мінеральної сировини.

Спорудження свердловин, причому, в більшості випадків, незалежно від їх призначення, ведеться із застосуванням операцій промивання та розмежування пластів [36]. Під процесами промивання розуміється наявність в стовбурі – отримуваної в земних надрах свердловини – циркуляції спеціального середовища, фізико-хімічні властивості якого повністю відповідають наявним геолого-технічним умовам. Розмежування пластів зводиться до реалізації комплексних робіт з кріплення стінок стовбура свердловин обсадними трубами та заповненням утвореного таким чином кільцевого простору (між зовнішньою поверхнею обсадних труб та породними стінками свердловини) закачуванням, у різні способи, цементним (тампонажним) розчином [105].

В залежності від вимог щодо розвідувально-експлуатаційних завдань для свердловини, значне поширення отримали бурові промивальні рідини із дисперсійним середовищем у вигляді технічної води, в якому рівномірно розподілені частинки дисперсної фази, здебільшого глини того, або іншого мінералогічного складу. Важливість процесу промивання свердловин переоцінити складно, оскільки перед ним стоїть велика кількість задач, що не окреслюються лише традиційним видаленням зруйнованої породи з вибою споруджуваної свердловини та охолодженням відповідного інструменту. Постійне ускладнення геологічних умов проведення свердловин, яке пов'язано із порушенням цілісності стовбура останніх, активним виникненням поглинань та проявів, недопущенням зміни стану екологічної рівноваги і т. ін., закономірно потребує застосування комплексних за рецептурою та функціональними ознаками дисперсних систем. Раціонально організований процес промивання свердловин, особливо

експлуатаційних, дозволить отримати – в підсумку – надійний технічно-придатний канал для видобутку корисних копалин. Коротко охарактеризувати сказане можна як забезпечення стійкості в часі свердловини, що представляє собою інженерну споруду, та збереження для неї максимально можливих показників щодо ступеню вилучення необхідних компонентів без порушень екологічної рівноваги [106].

Операціями розмежування пластів вирішується коло ключових питань, серед яких можна виділити саме недопущення міжпластових перетікань флюїдів, чим забезпечується: уникнення водогазонафтопроявів в затрубному просторі, виключення явища погіршення колекторських властивостей продуктивної зони свердловини, попередження ймовірності передчасного обводнення зони експлуатаційного об'єкту; разом із зазначеним створюються умови унеможливлення забруднення надр та навколишнього середовища.

Відповідно до результатів проведених нами досліджень і даних інших авторів, основні питання вдосконалення техніко-технологічних основ комплексного циклу розмежування пластів пов'язані із розробкою засобів (підготовки стовбура свердловини до спуску обсадних труб) та матеріалів (тампонажних і буферних сумішей), які максимально відповідатимуть стану стовбура свердловини і дозволять, в кінцевому підсумку, отримати надійну ізоляційну оболонку із високими експлуатаційними показниками [35].

Особливо великої значимості розглянуті нами фактори набувають для геотехнологічних свердловин (видобувних, окрім водозабірних і нафтогазових), оскільки вони передбачають, для окремих типів сировини, досить тривалі терміни роботи при забезпеченні наявності активного функціонування зони привибійного експлуатаційного інтервалу. Застосування свердловинних геотехнологічних прийомів і методів може бути виправдано можливістю доволі суттєвого зменшення капітальних вкладень в процеси видобутку корисних копалин. Крім вказаного, за означених умов, також допускається активне включення в ефективну систему розробки тих покладів, які відрізняються наступними рисами: відносно малою потужністю продуктивних пластів (так званих позабалансових), низьким вмістом в них корисних компонентів, розташуванням об'єктів видобутку на значних глибинах (з неодмінним негативним проявом геологічних факторів), що, загалом, не дозволяє проводити рентабельні гірничі роботи різного характеру.

У цілому можна підсумувати, що свердловинний видобуток, за належного техніко-технологічного забезпечення, дозволяє отримувати на поверхні, здебільшого, лише корисні копалини (в певному агрегатному стані), а це суттєво зменшує об'єми зайвих відходів виробництва, які необхідно утилізувати, і масштаби негативного впливу на навколишнє середовище. Для вірного розуміння особливостей свердловинних (іншими словами геотехнологічних) методів видобутку корисних копалин (знову зазначимо – окрім випадків експлуатації водозабірних і нафтогазових свердловин) необхідно позначити, що тут означена група специфічних гірських виробок виступає одночасно засобом розкриття, технологічної підготовки і видобутку корисних копалин.

Дієвим інструментом геотехнологічного виймання є спеціальні робочі агенти, які дозволяють чинити фізичний, хімічний, комбінований тощо вплив на об'єкт видобутку, в результаті чого змінюється агрегатний стан продуктивного пласта (його окремих корисних компонентів), можливі також випадки перетворення отриманого матеріалу в деяку іншу речовину. Яскравими прикладами реалізації геотехнологічних методів розробки родовищ можна вважати розчинення солей, гідравлічний видобуток вугілля і руд металів, розплавлення сірки, вилуговування металів (рис. 3.15), термічні способи підвищення нафтовіддачі пластів і т.д. Останнім часом поширення також отримують геотехнологічні методи видобутку, засновані на біохімічному і мікробіологічному впливі на поклад. Неодмінним атрибутом геотехнологічних методів видобутку являється утворення продуктивних флюїдів у той формі, що дозволяє їм майже безперешкодно бути відтранспортованими на поверхню. Керування розглядуваними процесами трансформації корисних компонентів може ефективно здійснюватися шляхом варіювання окремих гідравлічних характеристик циркулюючих агентів та їх фізико-хімічних властивостей.

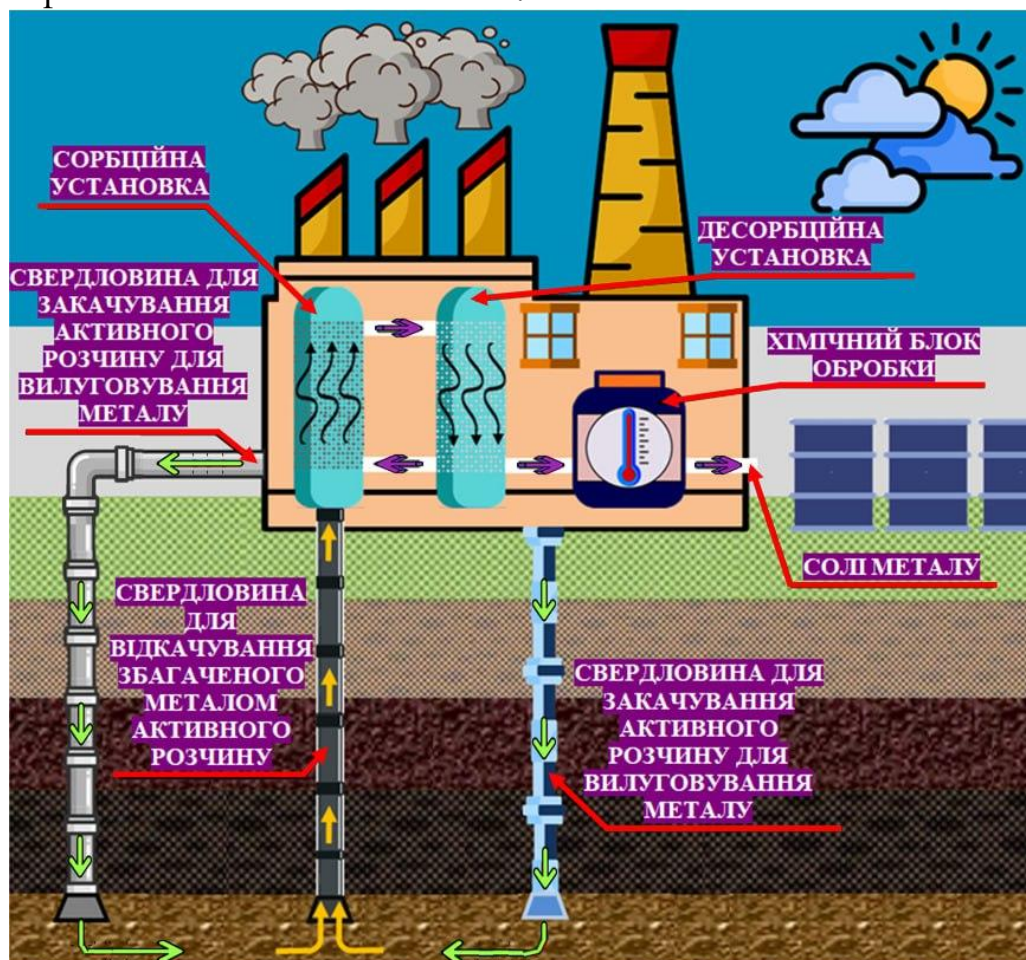


Рис. 3.15. Схематичне зображення технологічного комплексу підземного вилуговування металів

Необхідно зазначити, що роль свердловин при застосуванні геотехнологічних методів видобутку не зводиться тільки до необхідності якісного розкриття пластів корисних копалин, за ними залишається функція засобу відпрацювання

покладу. Саме за допомогою свердловин здійснюється замкнута циркуляція робочих агентів із подаванням останніх у зону продуктивного пласта і підйомом, отриманих у різні способи, збагачених корисними компонентами технологічних розчинів на поверхню. Бурові свердловини дозволяють виконувати виробничо-необхідні операції з контролювання процесів видобутку, що зводяться до визначення ступеню розвитку вибійних геотехнологічних процесів та з'ясування рівня повноти вилучення корисних компонентів з надр. Належним чином спроектовані та реалізовані в товщі гірських порід розглядувані інженерні споруди у вигляді свердловин, повинні максимально забезпечити охорону навколишнього середовища від можливого фізико-хімічного забруднення. Факторами якнайповнішого виконання сформульованої базової вимоги буде технологічно-виправдане здійснення операцій з промивання споруджуваних свердловин, що забезпечать уникнення прояву активної взаємодії дисперсного середовища, у вигляді того або іншого типу очисного агента, із оточуючими гірськими породами (з усіма негативними наслідками, зокрема, набухання і поглинання) та створять умови для отримання якісного експлуатаційного каналу, надійно ізольованого від взаємно обумовленого впливу гами фільтраційно-циркуляційних явищ в затрубному просторі свердловини.

Якраз проникністю гірських порід (що варіюється в досить широких межах) може бути пояснена імовірність забруднення підземних вод при виконанні операцій зі спорудження та експлуатації свердловин. В означених умовах потенційними джерелами забруднень можуть стати спеціальні технологічні рідини (промивальні, буферні, тампонажні системи, а також робочі циркуляційні середовища в певному геотехнологічному циклі). Внаслідок недосконалості виконання робіт з промивання і цементування свердловин, виникають суттєві порушення гідроізоляції обсадних колон геотехнологічних свердловин. Не можна залишати поза увагою і те, що окремі пласти-колектори містять у собі високомінералізовані агресивні води, а це є потенційним фактором появи вірогідності забруднення ними активно експлуатованих у побутових і промислових цілях водоносних горизонтів.

Певним чином забезпечити належну виробничу та екологічну досконалість процесів спорудження й подальшої експлуатації геотехнологічних, а також свердловин іншого призначення, можливо шляхом застосування спеціальних технологічних рідин – передусім промивальних і тампонажних. Вибір таких рідин здійснюється з урахуванням конкретних геолого-технічних умов, глибини, тиску, температури, фізико-хімічних властивостей порід і типу колекторів. Відповідність властивостей технологічних рідин цим умовам дозволяє досягти раціонального поєднання між безпечністю робіт, стабільністю стовбура свердловини та екологічною безпекою виробництва.

Промивальні рідини виконують функції очищення вибою від шламу, охолодження і змащення інструменту, підтримання стабільності стінок свердловини, запобігання викидам пластових флюїдів і мінімізації втрат циркуляції. Їх властивості, зокрема густина, в'язкість, фільтраційна здатність, змащувальна та тиксотропна поведінка, повинні бути оптимізовані відповідно до конкретних

умов буріння. Використання якісних промивальних рідин не лише підвищує технічну ефективність бурових процесів, а й зменшує ризик забруднення навколишнього середовища за рахунок зниження об'єму відходів і витоків у пласт.

Тампонажні рідини, у свою чергу, забезпечують надійне закріплення обсадних колон, герметизацію затрубного простору та ізоляцію водоносних чи газоносних горизонтів; їх склад і властивості визначають якість цементування, міцність цементного каменю та довговічність кріплення свердловини. Використання екологічно безпечних тампонажних систем із контрольованими реологічними параметрами та низьким вмістом токсичних компонентів сприяє зменшенню впливу на природні водоносні горизонти та поверхнєве середовище. Отже, застосування спеціальних технологічних рідин із раціонально підібраними характеристиками є важливим елементом комплексного підходу до підвищення технічної надійності, екологічної безпечності й економічної ефективності процесів буріння, кріплення та експлуатації свердловин.

Певним чином забезпечити належну виробничу та екологічну досконалість проведення робіт зі спорудження та експлуатації геотехнологічних (та іншого призначення) свердловин, дозволяє застосування різних спеціальних технологічних рідин (промивальних і тампонажних) із відповідними геолого-технічним умовам раціональними значеннями основних показників властивостей і різноманіттям виконуваних вказаними рідинами функцій [24].

Приймаючи до уваги необхідність надійної ізоляції зони експлуатаційного об'єкту свердловини, що передбачає повне виключення для останнього міграційних явищ активних хімічних середовищ, зазначимо наступне: запобіжником означеного буде якісне цементування експлуатаційної колони на прикладі свердловин підземного вилуговування копалин. На шляху належного виконання названого нами завдання стоїть проблема наявності на стінках стовбура свердловини фільтраційної глинистої кірки, яка у вищій мірі негативно впливає на основні технологічні показники цементного каменю при її потраплянні до закачуваного тампонажного розчину. Схематично такий процес можна описати в наступний спосіб: при русі висхідного потоку тампонажного розчину в затрубному просторі свердловини відбувається змив ним зі стінок свердловини глинистих утворень (разом із продуктами руйнування вибою), які активно розподіляються в об'ємі розчину та за різними схемами взаємодіють з ним, про це свідчать експериментальні відомості щодо досліджень фізичного стану цементного каменю. Відповідно до аналізу отриманих показників, можна стверджувати, що в залежності від вмісту глинистих утворень (у т.ч. і шламових частинок) в цементному камені (від 1 до 40%), міцність останнього знижується на 12 - 52%.

Уникнути розглянутих негативних явищ, таких як обвали стінок свердловини, прилипання бурильного інструменту, надмірна фільтрація ПР або ускладнення під час спуску обсадної колони, можливо завдяки застосуванню якісних промивальних рідин і впровадженню спеціальних технологічних прийомів підготовки стовбура свердловини до операцій з кріплення та цементування.

Високоякісна ПР повинна мати раціональні густину, в'язкість і стабільність, що забезпечує належне очищення стовбура від шламу, утримання стінок

свердловини в стабільному стані та запобігання проникненню фільтрату в породу. Важливим є також контроль колоїдної стійкості та тиксотропних властивостей, які дозволяють уникнути осідання вибурених частинок у періоди зупинки циркуляції.

Перед виконанням робіт із кріплення і цементування здійснюють комплекс підготовчих заходів: ретельне промивання стовбура, заміну бурового розчину на спеціальні промивальні або буферні рідини, які видаляють залишки шламу та створюють умови для рівномірного розподілу цементного розчину. Застосування буферних рідин із регульованими поверхнево-активними властивостями підвищує адгезію цементу до стінок свердловини та зменшує ризик утворення каналів або зон неповного зчеплення.

Співвідношення деяких основних функцій промивальних рідин та відповідних ним технологічних властивостей можна представити наступним чином. Показник в'язкості корелюється із здатністю бурової промивальної рідини стійко транспортувати продукти руйнування гірських порід певних розмірів; крім того він надає можливість регулювати інтенсивність поглинань промивальної рідини, навіть із повним виключенням вказаного явища.

Нами були проведені лабораторні дослідження щодо вивчення можливості застосування малоглинистих розчинів (із концентрацією дисперсної фази до 5% – бентонітової глини) в якості промивальних рідин для спорудження свердловин підземного вилюговування металів. Оскільки концентрація бентонітового порошку в промивальній рідині помірна, то це не дозволяє створити для такого очисного агента прийнятні показники в'язкості (T , с). Саме тому для обробки промивальної рідини додатково залучено спеціальний полімерний реагент – карбоксиметилцелюлозу (КМЦ). Надання циркулюючій в стовбурі свердловини промивальній рідині властивостей недопущення додаткового диспергування глинистої фази, відбувалось за рахунок обробки очисного агента реагентом-гідрофобізатором, а саме сульфатним милом (СМ). Результати проведених досліджень представлені в графічній формі на рис. 3.16.

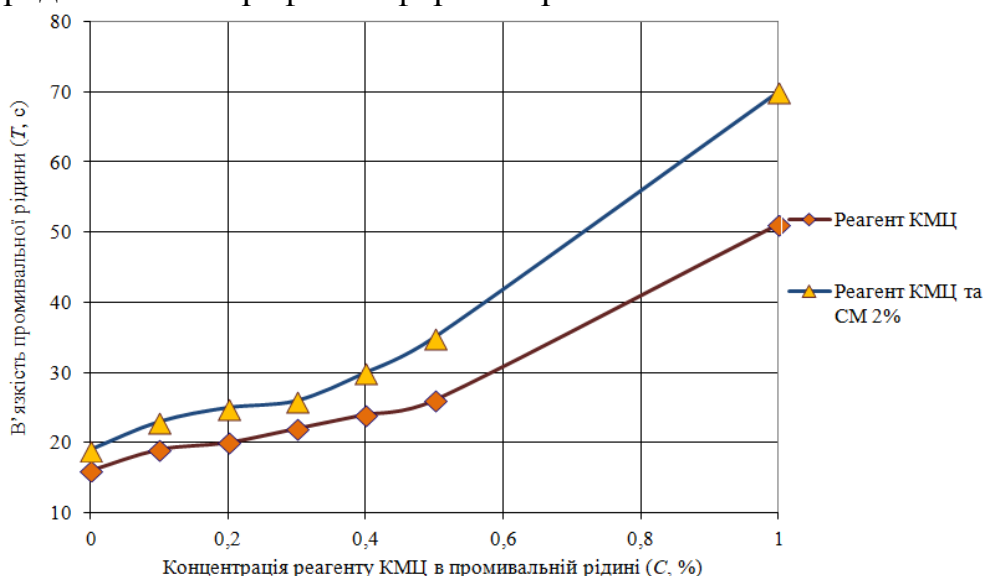


Рис. 3.16. Графічна інтерпретація механізму впливу хімічної обробки промивальних рідин (на основі бентонітових глин) на показники їх в'язкості

Відповідно до отриманих даних (рис. 3.16), констатуємо наступне: присутність КМЦ в промивальній рідині дозволяє підвищити її в'язкість (T) до прийнятних значень. Посилити названий ефект можна за рахунок застосування реагенту СМ. Вказані обставини створюють потенційні можливості для забезпечення прийнятних характеристик транспортуючої здатності промивальної рідини; вони практично виключають виникнення поглинань та додаткове негативне збагачення промивальної рідини глинистою фазою.

Наявність для дисперсної системи ознак утворення просторової структури, що характеризується показником статичної напруги зсуву (СНЗ) ПР, дозволяє уникнути, за раптового припинення руху останньої, закономірного випадіння шламів на вибій свердловини; структуровані ПР також відрізняються своєю стабільністю в часі. Присутність означених факторів для запропонованих нами промивальних рідин підтверджується відомостями рис. 3.17 та 3.18.

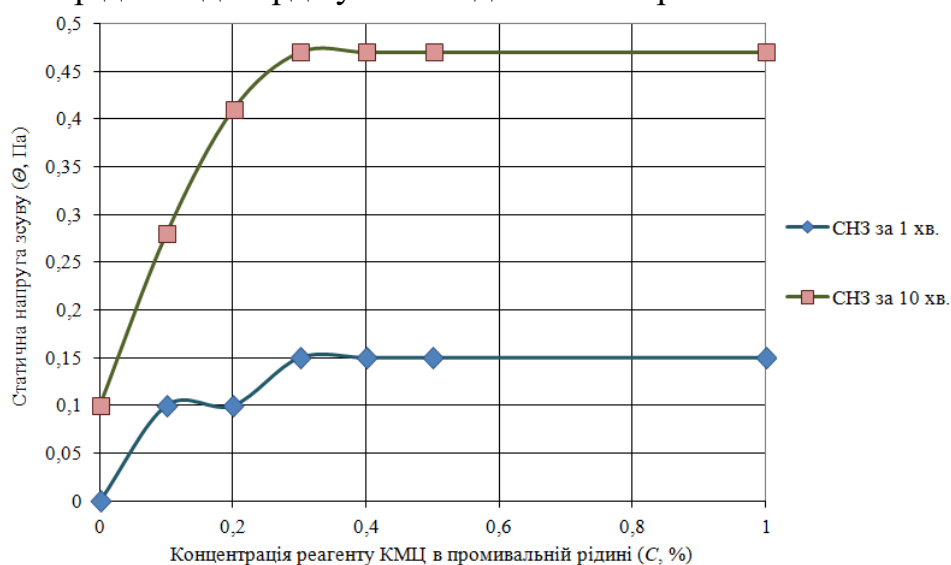


Рис. 3.17. Експериментальні значення для показника СНЗ при обробці промивальної рідини реагентом КМЦ

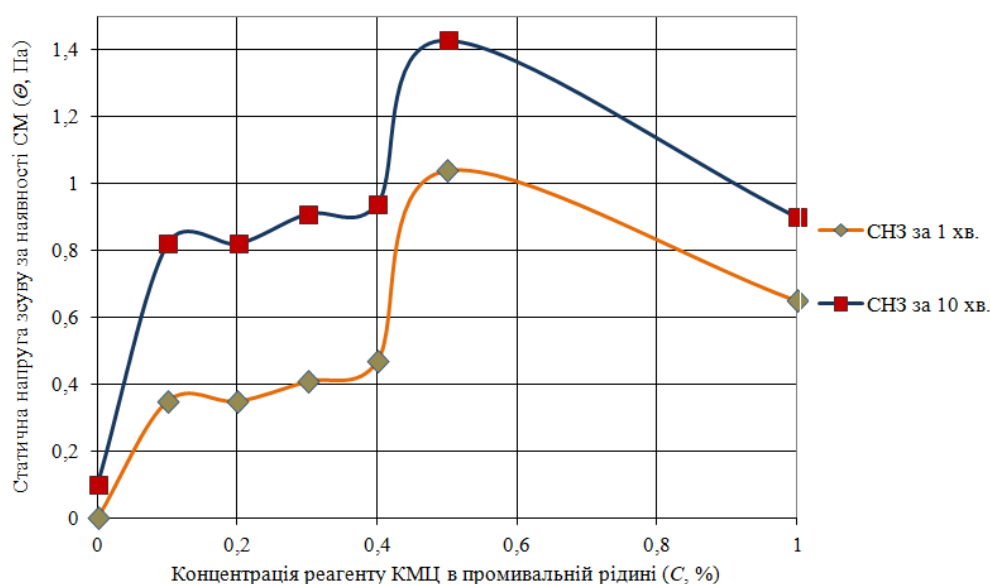


Рис. 3.18. Визначені лабораторними методами досліджень значення показника СНЗ при обробці промивальної рідини реагентом КМЦ та СМ

Представлені рис. 3.17 і 3.18 графічні відомості дозволяють стверджувати присутність різних механізмів впливу хімічної обробки на структурно-механічні властивості промивальних рідин. Показники статичної напруги зсуву (Θ , Па) для промивальних рідин, оброблених КМЦ, досягають своїх граничних значень при концентрації $C \approx 0,3\%$. У разі додаткової обробки глинистої промивальної рідини СМ, з $C = 2\%$, показник Θ характеризується ступеневим зростанням із підвищенням концентрації КМЦ, а після досягнення значення C для КМЦ, що дорівнює $C \approx 0,5\%$, параметр Θ суттєво знижується.

Регульовані межі прояву фільтрації (в даному випадку – водовіддачі) для ПР, із похідною вказаного – формуванням малопроникних глинистих кірок (рис. 3.19 і 3.20), забезпечують попередження набухання глинистих (та подібних ним) стінок стовбура свердловини внаслідок активного проникнення фільтраційної води. Нами експериментально вивчені результати впливу хімічної обробки промивальних рідин (за допомогою спеціальних реагентів) на показники водовіддачі (B , $\text{см}^3/30 \text{ хв}$) та товщини глинистої кірки (K , мм).

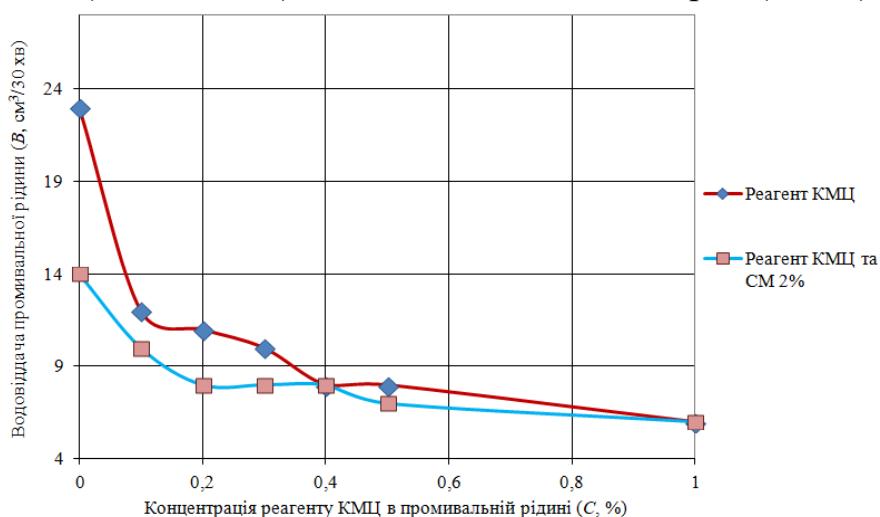


Рис. 3.19. Графічна інтерпретація впливу хімічної обробки глинистої промивальної рідини на показник її водовіддачі

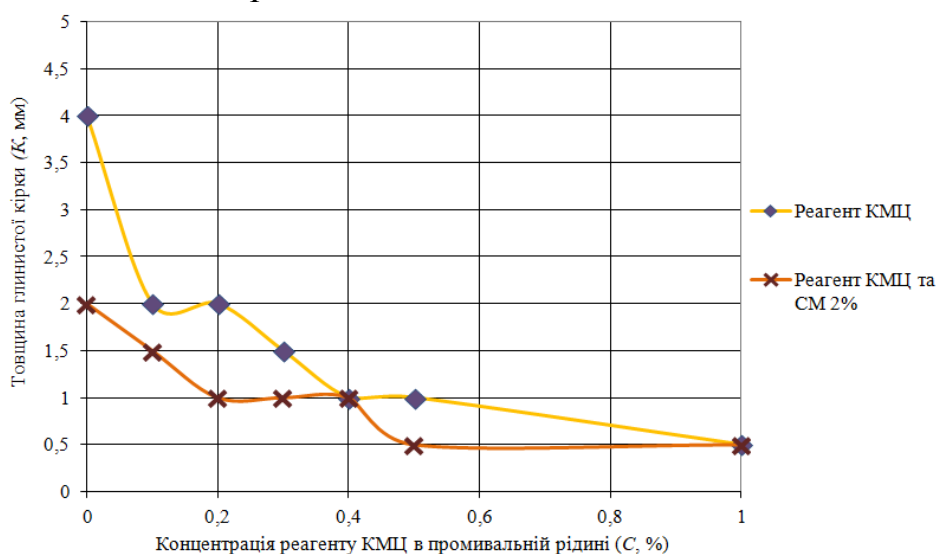


Рис. 3.20. Результати вивчення впливу хімічної обробки промивальних рідин на товщину фільтраційної глинистої кірки

Прийнятий нами регламент хімічної обробки промивальних рідин сприяє ефективному зниженню водовіддачі для циркуляційних середовищ; сформована останніми фільтраційна кірка також характеризується невеликими товщиною та проникністю для води. Означені параметри досягаються за значення концентрації реагенту КМЦ, що дорівнює 0,5%. Наявність присутності СМ майже не позначається на згаданих показниках.

Раціональні значення густини промивальної рідини дозволяють запобігати порушення цілісності стовбура споруджуваної свердловини та можливі флюїдопрояви (особливо для продуктивних горизонтів). Паралельно наведеним процесам, мають місце і такі негативні обставини: необґрунтовано завищені показники в'язкості циркулюючого агента провокують появу надмірних витрат гідравлічної потужності на прокачування промивальної рідини; структуроутворення – в розглядуваних дисперсних системах – потребує реалізації на буровому насосі значних пускових тисків; неякісна фільтраційна кірка (проникна, рихла та липка) сприятиме активному потраплянню дисперсійного середовища в гірські породи, а також виникненню зайвих витрат потужності на обертання бурильної колони через прихвати останньої глинистою фазою; через великі гідростатичні тиски стовпа промивальної рідини, обумовлені наявними показниками її густини, не виправдано знижується механічна швидкість буріння, в граничному випадку не виключено також і проявлення поглинаючої здатності пластів гірської породи.

Таким чином, застосування пропонованих нами рецептур промивальних рідин, при спорудженні свердловин підземного вилюговування металів, дозволить якісно створювати в товщі гірських порід названі експлуатаційні канали [15]. При їх спорудженні будуть дотримуватися вимоги щодо недопущення розповсюдження робочих і продуктивних розчинів з пластів корисних копалин через затрубний простір свердловин у водоносні горизонти. Обсадні колони розглядуваних свердловин будуть надійно ізольовані.

Разом із означеними позитивними сторонами процесів регулювання фізико-хімічних властивостей промивальних рідин присутні і негативні, їх основними рисами буде наступне. Вихід за межі раціональних значень в'язкості буде викликати збільшення витрат потужності для бурових насосів. Нераціональне процеси структуроутворення промивальних рідин потягнуть за собою потреби в наявності великих пускових тисків на буровому насосі. Неякісна, проникна, товста, а отже липка фільтраційна кірка буде фактором виникнення додаткових витрат потужності на обертання бурильних труб із паралельним їх прихватом. Надмірні значення густини промивальної рідини спровокують появу необґрунтованих значень вибійного гідростатичного тиску – основного чинника фактору зниження механічної швидкості поглиблення вибою свердловини; в означених умовах не виключено і проявлення гідравлічних розривів пластів із відповідними екологічними наслідками [107].

Головними функціональними характеристиками промивальних рідин повинно бути: легка прокачуваність, інертність до диспергування зруйнованих гірських порід, прийнятний діапазон густин, здатність до кольтатації фільтра-

ційних каналів стінок стовбура свердловини та деякі ін., що можуть бути отримані для циркуляційних середовищ шляхом хімічної обробки екологічно нешкідливими хімічними реагентами. Деякі ознаки таких реагентів наведені в табл. 3.4 із підтвердженням їх дієвості шляхом лабораторного вивчення, що ґрунтувались на необхідності створення умов недопущення порушень екологічної рівноваги при реалізації циркуляційних процесів.

Таблиця 3.4.

Деякі технологічні та екологічні характеристики застосовуваних для обробки промивальних рідин реагентів-регуляторів

Найменування застосовуваного реагенту	ГДК в повітрі робочої зони, мг/м ³	Клас небезпеки	Рекомендовані концентрації (в перекладі на вихідний продукт)	Екологічна характеристика
Понижувачі водовіддачі				
Вуглелужний реагент (ВЛР)	2,0	IV	5 - 20%	Клас токсичності - IV
Концентрована сульфїт-спиртова барда (КССБ)	0,42	IV	3 - 10% (в прісних розчинах)	Клас токсичності - IV
			1 - 3% (в прісних розчинах)	
			1 - 4% (в прісних і висококальцієвих)	
			1 - 5% (в мінералізованих)	
			1 - 6% (в мінералізованих при t до 200 ⁰ C)	
Карбоксиметилцелюлоза (КМЦ)	10,0	IV	0,5 - 1,0% в прісних і мінералізованих при рН = 8 - 10	Клас токсичності - III
			1,0 - 2,0% в високомінералізованих	
			1,0 - 2,5% в високомінералізованих	
Інгібітори глин і глинистих порід				
Хлористий калій KCl	5,0	III	3 - 7%	Клас токсичності - III
Хлористий кальцій CaCl ₂	5,0		1,5 - 3,0%	
Мастильні добавки				
Сульфанол НП-1	5,0	III	0,05 - 0,2%	Клас токсичності - III
Емульгатори				
Емульсол лісохімічний ЕЛ-4	10,0	IV	0,5 - 5,0% в водах підвищеної жорсткості	Клас токсичності - IV
Емульсол нафтохімічний ЕН-4			1.0 - 5.0% в жорстких водах	

Підсумовуючи наведені відомості можемо стверджувати, що використання різних за складом хімічних сполук для раціоналізації процесів спорудження свердловин являється обов'язковим. Саме він виступає базою екологічних по-

переджувальних мір, спрямуванням яких є виключення прояву забруднення окремих компонентів навколишнього природного середовища, а саме ґрунтів, поверхневий водоймищ і пластових вод, а також атмосфери окремими компонентами промивальних рідин та розподіленими в них різним чином хімічними сполуками (здебільшого ПАР). З метою недопускання попадання фільтрату ПР, хімічних реагентів-регуляторів, стічних вод, площадки під буровою установкою, силовими та енергетичними агрегатами, насосними установками, блоком приготування та регенерації промивальних рідин, складом хімічних реагентів повинні бути викладені залізобетонними плитами, щілини між якими необхідно загерметизувати цементним розчином або бетоном на товщину застосовуваних плит. Доставляння застосовуваних при обробці промивальних рідин і тампонажних розчинів хімічних реагентів-регуляторів на буровий майданчик необхідно передбачати в герметичній тарі, яка унеможливило б прояв негативного впливу на навколишнє середовище та обслуговуючий персонал від випаровування, розпорошування активних хімічних сполук при вантажних роботах. Недопущення забруднення приповерхневих водоносних горизонтів відходами буріння (відпрацьовані промивальні рідини, буровий шлам тощо), ґрунтується на необхідності їх тимчасового зберігання в спеціальних земляних обвалованих та гідроізованих шламових амбарах (рис. 3.21).



Рис. 3.21. Приклади шламових амбарів при спорудженні свердловин

Таким чином, перелічені екологічні заходи покликані забезпечити захист ґрунту і підземних вод від проникнення в них поверхневих забруднювачів у вигляді фільтрату промивальних рідин та активних хімічних компонентів останніх і нафти, а також будуть зберігати геологічне середовище від негативного впливу процесів та явищ геологічного і техногенного характеру.

Практика бурової справи показує небезпечність для геологічного середовища та довкілля неконтрольованих нафтогазоводопроявлення (які можуть переходити навіть у відкрите фонтанування); означене, як правило, є результатом застосування невірних технологічних рішень при розкритті напірних продуктивних горизонтів. Запроектовані в геологічно-технічному проекті регламентні рішення повинні бути відображені разом із заходами щодо попередження їх негативних наслідків або усунення екологонебезпечних факторів. Види конструк-

ції свердловин повинні передбачати недопущення гідророзриву пластів; застосуване противикидне обладнання повинно забезпечити недопущення викидів; режим циркуляції та параметри відповідних середовищ повинні створювати безперешкодний процес поглиблення свердловини із збереженням стійкості стінок останньої; технологія кріплення і цементування свердловин повинні переслідувати мету надійного розмежування пластів та створення експлуатаційно-придатного каналу отримання копалин.

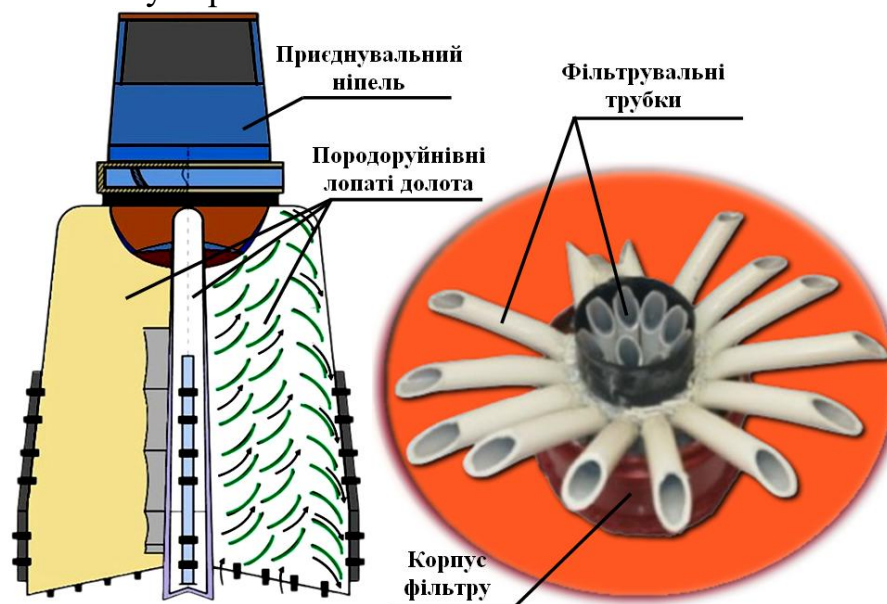


Рис. 3.22. Раціональні конструкції бурового долота та фільтру

Отримання для вибійної експлуатаційної зони свердловини прийнятних показників щодо фільтрації пластових флюїдів може бути забезпечена шляхом раціонального розкриття та обладнання добувних свердловин ефективними конструкціями фільтрів до яких належить нами запропонований буровий інструмент (бурове долото) та фільтр комбінованого компонування (рис. 3.22). Конструктивне оформлення робочої частини, а також технологічний режим відпрацювання означеного бурового долота забезпечують отримання стабільно високих показників механічної швидкості руйнування гірських порід, зниження інтенсивності зношення озброєння, раціоналізацію вибійних циркуляційних процесів, зменшення витрат потужності на обертання долота в шламовій подушці. Конструкцію фільтра відрізняє наявність численних фільтрувальних труб, виготовлених за сифонним принципом, а також схема їх поєднання в цілісний проточний орган. Для означеного фільтру реалізовано оригінальна схема руху флюїдів за мінімальних значень гідравлічного опору із паралельним збільшенням площі поверхні ефективної фільтрації. Перераховані особливості конструктивного виконання фільтру сприяють досягненню прийнятних показників швидкості фільтраційних потоків. Майже повністю виключається потрапляння крізь фільтр фрагментів гірської породи; знижує інтенсивність прояву корозійних явищ і допускає оперативне технічне обслуговування та заміну. Пропонований фільтр може бути застосований для фільтрації різних типів флюїдів із ви-

соким коефіцієнтом їх вилучення при одночасному тривалому терміні роботи із забезпеченням недопущення негативного впливу вибійних процесів на оточуюче середовище.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3

У результаті розгляду аспектів створення раціональних схем циркуляції спеціальних технологічних рідин при спорудженні свердловин встановлено, що ефективність бурових робіт значною мірою визначається правильною організацією циркуляційного процесу.

1. Вивчення підходів до розробки порядку організації руху промивальних і тампонажних рідин показало, що раціональна схема циркуляції повинна забезпечувати стабільне очищення вибою, мінімальні гідравлічні втрати, рівномірний розподіл тиску по стовбуру свердловини та запобігання ускладненням, пов'язаним із втратами циркуляції або обвалами порід.

2. Раціоналізація алгоритму проектування режимів циркуляційних процесів передбачає врахування комплексу факторів: геолого-технічних умов, глибини, діаметра свердловини, характеристик порід, типу і властивостей промивальної рідини, а також параметрів бурового обладнання.

3. Адекватне застосування системного підходу до вибору режимів циркуляції дозволяє досягти раціонального співвідношення між швидкістю руху рідини, тиском, в'язкістю та температурними умовами, що сприяє підвищенню продуктивності буріння і зниженню енергетичних витрат.

4. Раціональні схеми циркуляції спеціальних технологічних рідин є ключовою складовою ефективного управління процесом спорудження свердловин. Їх правильне проектування і реалізація забезпечують стабільність стовбура, безпеку робіт, економію ресурсів і зменшення негативного впливу на навколишнє середовище.

РОЗДІЛ 4. ПРОБЛЕМАТИКА ЕКОЛОГІЧНИХ ПИТАНЬ СПОРУДЖЕННЯ СВЕРДЛОВИН РІЗНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

4.1 Деякі характеристики процесу порушення нормального стану довкілля при спорудженні свердловин

Корисним буде нагадати про деякі важливі для подальших досліджень визначення щодо особливостей ґрунтів [108]. Відповідно до сучасних наукових уявлень, ґрунтом вважається утворення природного походження, яке за складові має певні, генетично між собою пов'язані, горизонти, формування яких відбувається шляхом закономірної трансформації літосферних приповерхневих шарів. Причому вказані перетворення відбуваються за активного впливу різних чинників, а саме: води, повітря і цілого ряду живих організмів.

Для ґрунту прийнято розрізняти його фазові складові, а саме: тверду (це каркас ґрунту, який складається з мінералів, органіки, в певній мірі розкладеної і трансформованої у гумус; названу фазу характеризують за гранулометричним, хімічним, мінералогічним складом та структурою і пористістю), рідку (до якої відносяться ґрунтові води з розчиненими в них органічними та мінеральними речовинами), газоподібну (тобто ґрунтове повітря, яким заповнюються вільні від води ґрунтові пори, причому розглядуване повітря перебуває в динамічній рівновазі із ґрунтовими водами), і так звану біофазу (до якої відносяться організми, що знаходяться в ґрунті та формують його).

На теперішній час гірничо-видобувний сектор вважається одним з найголовніших напрямків розвитку індустрії України, який забезпечую значну частку фінансових надходжень. Не слід забувати також і про сільське господарство, що також входить у провідну групу галузей виробництва. Причому між цими галузями існує певний незримий зв'язок, який можна простежити на прикладі істотного впливу на ґрунти провадження робіт з розробки родовищ, яке проявляється у ймовірному порушенні якості сільськогосподарських земель через їх, приміром, забруднення.

Під час спорудження свердловин різного призначення відбувається складний техногенний процес, який супроводжується порушенням нормального стану довкілля [109]. Найперше виникають механічні порушення геологічного середовища: знімається родючий шар ґрунту, руйнується рослинний покрив, утворюються відвали, котловани, насипи та інші елементи техногенного рельєфу. Ґрунт ущільнюється під дією важкої допоміжної і бурової техніки, що знижує його водопроникність і родючість. Такі зміни призводять до деградації земель і втрати природної рівноваги [110].

Хімічне забруднення є одним із найнебезпечніших наслідків буріння. Бурові розчини (ОА), шлами, мастила й паливно-мастильні матеріали містять токсичні сполуки, які при потраплянні у ґрунт або воду спричиняють тривале забруднення. Під час аварійних ситуацій або порушення технологічного режиму можливі витіки нафти та газу, що забруднюють поверхневі й підземні води, а також атмосферу. У дощовий період шкідливі речовини можуть змиватися з

бурових майданчиків у природні водойми, спричиняючи загибель водних організмів і зміну хімічного складу води.

Порушення гідрологічного режиму також є характерною рисою розгляданого процесу. Внаслідок буріння відбувається перетікання підземних вод між горизонтами, змінюється їхній рівень і мінералізація. Тривале водовідведення може спричинити осушення поверхні, а порушення дренажу – підтоплення територій. Забруднення водоносних горизонтів відбувається через негерметичність обсадних колон або неякісне цементування, що призводить до потрапляння бурових рідин у питні води.

Атмосфера також зазнає впливу через викиди відпрацьованих газів дизельних двигунів, пилу, випаровування вуглеводнів, а також шум і вібрації бурових установок. Це погіршує якість повітря, створює дискомфорт для людей і тварин, а тривала дія вібрацій може навіть спричинити локальні зсуви чи осідання ґрунту.

Біологічні наслідки проявляються у втраті біорізноманіття. Руйнуються природні середовища існування, тварини залишають території через шум і світлове забруднення, а рослинний покрив деградує під дією механічного та хімічного впливу; порушується структура екосистем, знижується їхня стійкість і здатність до самовідновлення.

Соціально-екологічні наслідки полягають у погіршенні умов життя населення поблизу бурових майданчиків; люди стикаються з забрудненням води та повітря, підвищенням рівня шуму, пилу й ризиком техногенних аварій – це може впливати на здоров'я населення, викликати конфлікти через використання природних ресурсів і знижувати рекреаційну привабливість територій.

Типовими аварійними ситуаціями є викиди газу або нафти при розкритті пластів, прориви свердловин, розливи вуглеводнів, вибухи й пожежі; такі події мають особливо небезпечний характер, адже наслідки можуть охоплювати великі площі та зберігатися роками.

Зменшення негативного впливу можливе завдяки впровадженню природоохоронних заходів: використанню екологічно безпечних бурових розчинів, повторному використанню очищених шламів, герметизації обсадних колон, встановленню локальних очисних споруд для стоків, постійному моніторингу стану довкілля й рекультивації земель після завершення робіт. Комплексне дотримання таких вимог дозволяє знизити екологічне навантаження й забезпечити більш раціональне використання природних ресурсів [111].

Видобуток різних видів корисних копалин (до яких ми відносимо нафту, газ, вугілля, метали та багато інших, а також воду), як, власне, пошук і розвідка їх родовищ, неможливі без застосування гірничих робіт, до яких відноситься влаштування відкритих та підземних гірничих виробок. Причому кожні з названих класів виробок мають свій рівень негативного впливу на оточуюче середовище, зокрема стан ґрунтів. Проведення робіт зі спорудження відкритих гірничих виробок (найбільш розповсюджені з них це котловани і кар'єри) супроводжується доволі масштабними порушеннями ландшафту, ерозією, втратою цінних родючих земель, виникненням явищ забруднення водного і повітряного

середовищ, осушенням прилеглих експлуатованих водоносних горизонтів, певною втратою біорізноманіття. Для підземних виробок є характерним дещо менший ступінь порушення природного ландшафту, а також на передній план виходить вплив на глибинні води, не слід залишати поза увагою можливість виникнення просідання земної поверхні.

Необхідно позначити, що свердловини (а це також специфічна група гірничих виробок) та класичні гірничі виробки вважаються основними засобами багатостадійного процесу отримання корисних копалин або здійснення інших видів геологічних робіт; вони також мають різні взаємні переваги, які яскраво проявляються в залежності від конкретних умов.

Впливовим чинником застосування саме класичних гірничих виробок, навіть через значні негативні екологічні наслідки (у т.ч. і для сільського господарства), є можливість видобутку великих об'ємів корисних копалин та здійснення видобувних робіт на значних площах.

До переваг свердловин слід віднести значно менші капітальні витрати, підвищення безпечності ведення робіт, достатньо високу швидкість спорудження, а також скорочення масштабності впливу на ландшафт. Роблячи вибір між відкритим і підземним (свердловинним) видобутком завжди необхідно приймати до уваги наявні виробничі, геологічні, географічні, екологічні і економічні умови, але тут, в обов'язковому порядку, потрібно забезпечити баланс між ефективністю видобутку і охороною навколишнього середовища.

Необхідно зазначити, що основу національної економіки становлять багатогалузева промисловість (сюди ми включаємо нафтогазову галузь), сільськогосподарське виробництво та сфера послуг. Промисловість та сільськогосподарське виробництво потребують свого забезпечення енергоносіями та сировиною, основою яких виступають вуглеводні. Надійне досягнення високого рівня енергетичної незалежності нашої держави може бути здійснено на підставі суттєвого збільшення видобування вуглеводнів (в нашому випадку нафти і газу). Підґрунтям вказаного виступає необхідність спорудження нових свердловин та докорінна модернізація, за допомогою інноваційних технологій, виведених з експлуатації (рис. 4.1).



Рис. 4.1. Приклади розташування бурових майданчиків

Певною яскравою особливістю вітчизняних галузей промисловості та сільськогосподарського виробництва є спільне використання земельних ресурсів. Причому результатом вказаної особливості буде погіршення якості сільськогосподарських ґрунтів під впливом явищ забруднення і деградації.

Відповідно до існуючих уявлень, ґрунти вважають найважливішим ресурсом, оскільки останні характеризуються родючістю, яку можна визначити здатністю забезпечувати потреби рослинних організмів у необхідних поживних речовинах. Для рослин вказана обставина трансформується в інтенсивне зростання, розвиток, а також вельми важливу біологічну продуктивність, тобто врожайність певного типу сільськогосподарських культур. Відомо, що родючі ґрунти відрізняються високим вмістом гумусу, містять групу макро- та мікроелементів, які забезпечують стійкий розвиток рослин. Присутність негативних змін для ґрунтів викликає суттєве погіршення умов існування рослинних та тваринних організмів [112].

Необхідність спорудження пошукових, розвідувальних та експлуатаційних свердловин на нафту і газ пов'язана із потребою забезпечення нашої держави енергетичними ресурсами та хімічною сировиною власного видобутку. Власне процес спорудження (іншими словами – влаштування) названої нами категорії свердловини складається з наступних основних і логічно послідовних етапів, до яких відноситься: буріння, як процес руйнування гірської породи на вибої свердловини; кріплення стінок стовбуру свердловини спеціальними трубами та наступне їх цементування шляхом нагнітання тампонажного розчину у затрубний простір; реалізація прийомів випробування свердловини на наявність припливу нафти і газу (рис. 4.2).



Рис. 4.2. Типові бурові майданчики із відповідним обладнанням

Проведення робіт з видобутку корисних копалин неможливо собі уявити без спорудження свердловин, функціями яких виступає, власне, пошук родовищ, отримання вичерпних геологічних відомостей про поклад, створення промислового комплексу вилучення необхідних компонентів з надр [113].

Без проведення спеціальних підготовчих прийомів родючий шар ґрунту, який знаходиться в межах планованих бурових майданчиків, буде зазнавати не-

гативного впливу від використовуваної техніки, а також може стати зоною забруднення численними відходами буріння (до прикладу промивальні рідини), які вміщують в себе небезпечні хімічні реагенти значної активності.



Рис. 4.3. Приклади ґрунтових кагатів (буртів) в межах бурових майданчиків

Важливою операцією, яка передує безпосередньо бурінню свердловин, являються комплексні роботи з підготовки виробничих земельних ділянок для монтажу бурового обладнання. Необхідно позначити, що в переважній більшості випадків спорудження свердловин проєктні ділянки знаходяться в межах територій активного сільськогосподарського користування, а це потребує вжиття важливих охоронних заходів. Такими заходами виступає зняття, в зоні ведення активних робіт, ґрунтового покриву (тобто родючого шару ґрунту) промислової земельної ділянки та наступне його складання в кагати (або бурти), які розміщуються по периметру бурової ділянки із метою їх використання в роботах з відновлення порушеного ґрунтового покриву (рис. 4.3).

Таким чином обов'язкове знімання родючого шару ґрунту виконується до початку здійснення монтажних робіт. Як правило, родючий шар знімається скрепером або бульдозером із виконанням поперечних ходів у зоні технічної рекультивації. Висота кагатів (буртів) становить приблизно 3 м, а кут їх відкосу складає до 45°. Вимагається проведення знімання родючого шару селективно, тобто за два заходи, із недопущенням змішування знятих у такий спосіб шарів ґрунту. Мінімізація шкідливого впливу бурових робіт на ґрунти із наступним відновленням їх родючості також пов'язана із проведенням певного комплексу операцій з рекультивації (технічного і біологічного характеру). Причому технічна рекультивація полягає у збереженні родючого шару, а біологічна передбачає відновлення родючості ґрунту.

Ефективне здійснення необхідних природоохоронних вимог до циклу видобування (або інших подібних робіт) [114] загалом і процесів спорудження свердловин різного призначення зокрема, може бути досягнуто на підставі впровадження надійних технічних, технологічних та екологічних процедур, скорегованих відносно наявних природно-кліматичних, географічних та геологічних особливостей конкретної промислової ділянки. Отже, неможливо дати собі уяву про подальший сталий розвиток окремих секторів промисловості без

широкого застосування раціонально-побудованих технологій, що повністю корелюються із певними екологічними обмеженнями [115].

Наступне повернення родючого шару ґрунту на звільнені від бурового обладнання порушені земельні ділянки повинно здійснюватися в повному об'ємі. Отже, у вищій мірі ефективні заходи з охорони земель (родючих ґрунтів) повинні бути спрямовані на здійснення їх раціонального і збалансованого використання, уникнення необґрунтованого вилучення земель з активного сільськогосподарського обігу, а також дієвий захист від шкідливого антропогенного впливу, наслідком чого, у логічній послідовності, стане відтворення і підвищення ступеню родючості ґрунтів.

4.2 Вивчення особливостей природоохоронних технологій при спорудженні свердловин та основних вимог до них

Природоохоронні технології при спорудженні свердловин – це комплекс технічних, організаційних і технологічних рішень, спрямованих на мінімізацію негативного впливу бурових робіт на довкілля; вони охоплюють усі етапи – від підготовки майданчика до ліквідації свердловини.

Під час підготовчих робіт застосовуються технології раціонального вибору місця розташування бурової з урахуванням ландшафтних, гідрологічних та екологічних умов. Майданчик розміщують поза межами водоохоронних зон, лісових масивів і сільськогосподарських угідь. Виконується зняття та збереження родючого шару ґрунту з подальшим його використанням під час рекультивації.

У процесі буріння впроваджуються маловідходні та безвідходні технології. Зокрема, використовуються замкнуті системи циркуляції бурових розчинів, що унеможливають потрапляння шламів у навколишнє середовище. Замість токсичних реагентів застосовують екологічно безпечні бурові рідини на водній або полімерній основі. Шлами та відпрацьовані розчини очищують і повторно використовують у виробничому циклі.

Важливим напрямом є захист підземних вод. Для цього забезпечується герметизація обсадних колон, якісне цементування, контроль тиску та запобігання міжпластовим перетокам. На поверхні здійснюється ізоляція майданчика бурової: обладнуються спеціальні бетоновані або полімерні піддони для збору стоків і запобігання проникненню хімічних речовин у ґрунт.

Під час експлуатації бурових установок застосовується очищення викидів і зменшення шумового навантаження. Використовуються глушники, пилогазоуловлювачі, системи рециркуляції повітря. Всі машини проходять регулярний технічний контроль, щоб знизити рівень забруднення атмосфери продуктами згоряння.

Особливе значення має поводження з відходами; вони збираються у спеціальні контейнери, відстійники або полігони, де проходять нейтралізацію. Заброньовується спалювання бурових шламів або зливання їх у водойми.

Після завершення робіт виконується ліквідація свердловини та рекультивація земель; зруйновані ділянки вирівнюють, родючий шар ґрунту повертають,

проводять біологічне відновлення рослинного покриву.

Основні вимоги до природоохоронних технологій при бурінні свердловин: одночасний захист усіх компонентів довкілля: повітря, води, ґрунтів, біоти; повторне використання матеріалів і мінімізація відходів; виключення можливості витоків бурових рідин і вуглеводнів; постійне спостереження за станом навколишнього середовища та оперативне реагування на відхилення; обов'язкове проведення рекультиваційних робіт після завершення буріння; дотримання законодавства України у сфері охорони навколишнього природного середовища. Такі технології дозволяють зменшити екологічний ризик, забезпечити стійке функціонування бурових підприємств і зберегти природний баланс у районах видобутку корисних копалин.

Найбільш небезпечним для геологічного середовища можуть бути інтенсивні неконтрольовані нафтогазопроявлення, особливо у випадку їх переходу у відкрите фонтанування (відмічене може статися при розкритті високонапірних нафтогазоносних горизонтів). Для запобігання виникнення вказаних явищ, технологією буріння (що повністю відображена в геолого-технічному проєкті на спорудження свердловини) повинно бути передбачено застосування комплексних техніко-технологічних рішень, а саме: вибір раціональної конструкції свердловини, яка повністю унеможливило гідророзрив розкритих свердловиною гірських порід; надійна герметизація гирла відповідним противикидним обладнанням (рис. 4.4); підбір типорозміру та матеріалу труб обсадної колони, виходячи з очікуваного максимально можливого тиску на гирлі свердловини в процесі буріння останньої і випробування на приплив пластових флюїдів; обґрунтування технологічних параметрів промивальної рідини, що забезпечують (серед іншого) створення необхідного гідростатичного тиску в свердловині, перевищуючого пластовий.



Рис. 4.4. Конструкція противикидного обладнання (превентора) та приклад його встановлення на гирлі свердловини

Приймаючи до уваги функції свердловинних циркуляційних середовищ, можна сформулювати до них деякі вимоги технологічного і екологічного змісту, а саме: відсутність активного фізико-хімічного впливу на буровий інструмент; прийнятність гідравлічних характеристик потоку; зручність здійснення операцій з приготування та регенерації (замкнутий цикл використання ПР, що забезпечить виключно високі екологічно-безпечні характеристики операцій зі спорудження свердловин). Номенклатура нині застосовуваних промивальних рідин, а більш широко – очисних агентів різноманітна, від технічної води, глинистих та безглинистих дисперсних систем до емульсій, розчинів полімерів, пін та стиснутого повітря. Кожний зазначених типів очисних агентів має вплив на оточуюче середовище і, проте його сутність доволі неоднозначна та може бути піддана відповідному регулюванню з метою унеможливлення шкідливої екологічної дії на, до прикладу, надра та ґрунти [116].

Комплексний аналіз обставин отримання свердловин в товщі гірських порід показує наступне: дотримання виконавчої безпеки та екологічності технологічних операцій, в більшості випадків, може бути здійснено за допомогою нормування технологічних показників та званих спеціальних рідин, під якими розуміється очисні агенти, буферні рідини, тампонажні розчини і т. ін. Причому параметри вказаних рідин повинні відповідати нормативним вимогам унеможливлення порушень екологічної рівноваги [117].

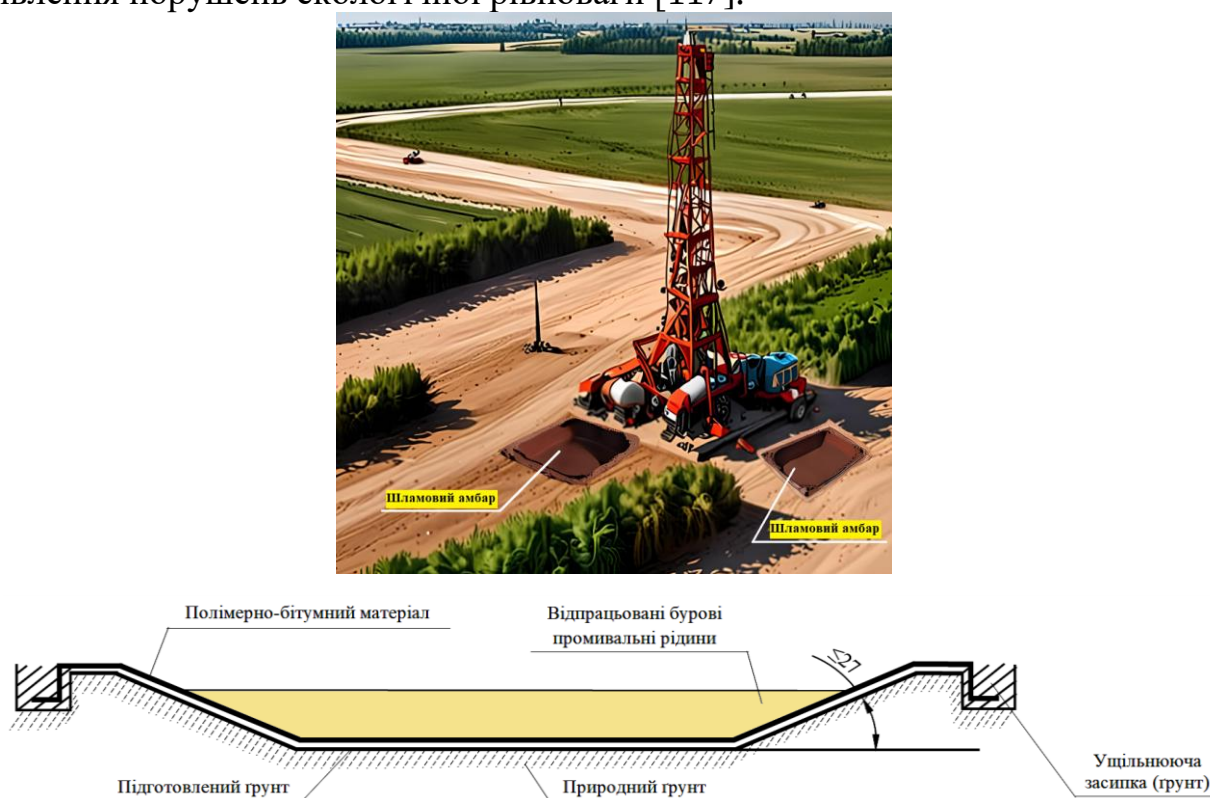


Рис. 4.5. Схематичне зображення бурової ділянки та влаштованого у ґрунті шламового амбару

Отримання для спеціальних, підкреслимо технологічних рідин, раціональних показників може базуватися на необхідності застосування спеціальних ви-

дів обробки циркуляційних середовищ фізичними і хімічними полями, з яких, найбільш небезпечними є процеси і наслідки хімічної обробки. Саме тому бурова площадка повинна бути спроектована таким чином, щоб допускати безпечне зберігання активних хімічних реагентів і недопущення їх потрапляння в ґрунти та проникні пласти хімічних сполук з циркуляційного контуру бурової свердловини (очисна ланка та відстійники – шламові амбари) орієнтовна схема розташування і облаштування вказаних амбарів представлена на рис. 4.5.

Неодмінним елементом геолого-технічного проекту на спорудження свердловини повинен виступати план підготовчих заходів до початку процесів споруджень свердловин, плани ліквідації можливих ускладнень і аварій з екологічними аспектами та регламент виконання заключних робіт (обладнання гирла свердловини, ліквідація неперспективних свердловин, заходи з рекультивації виробничих ділянок та операції із знешкодження відходів (керн, активний шлам, інші подібні компоненти) комплексних процесів спорудження та передачі в експлуатацію свердловин [109].

Надійне забезпечення нормативної якості природного середовища під час спорудження свердловин здійснюється двома основними шляхами [118]. Перший полягає у вдосконаленні технологічних процесів буріння з метою істотного підвищення рівня їх екологічної безпеки; сформульоване означає перехід на сучасні екологічно орієнтовані методи буріння, які мінімізують об'єми відходів, зменшують споживання води, енергії та шкідливих реагентів, а також передбачають замкнені цикли використання бурових розчинів і технологічних вод. Важливим є застосування герметичного обладнання, систем очищення стічних вод, уловлювання газів та пилу, а також впровадження моніторингових систем для контролю впливу на довкілля в режимі реального часу. Другий напрям передбачає створення й використання спеціальних технологій утилізації та нейтралізації бурових відходів, що неминуче виникають у процесі будівництва свердловин. Такі технології спрямовані на зниження токсичності, об'єму та небезпеки відходів до рівня, безпечного для довкілля. До них належать фізико-хімічні методи очищення, термічна та біологічна детоксикація, твердофазна стабілізація шламів, а також утворення спеціальних полігонів для їх ізолюваного зберігання.

Важливим аспектом є раціональне розсіювання залишкового забруднення у літосфері та гідросфері, тобто організація таких умов скиду або розміщення очищених відходів, при яких концентрації шкідливих речовин не перевищують екологічно допустимих норм. Це досягається завдяки контролю місць і глибини захоронення, розрахунку допустимого навантаження на природні середовища, а також використанню природних фільтраційних і самоочисних властивостей ґрунтів та водних систем.

У комплексі розглянуті підходи – підвищення екологічності технологічних процесів і впровадження ефективних систем утилізації відходів – формують основу сучасної екологічно безпечної стратегії буріння; їх реалізація дозволяє не лише знизити техногенне навантаження на навколишнє середовище, а й забез-

печити дотримання екологічних нормативів, стале використання природних ресурсів і збереження природних екосистем у районах промислового освоєння.

На даний час опубліковано та знаходиться у вільному доступі значне число науково-практичних робіт й примірників виробничої інформації стосовно широкого кола аспектів спорудження свердловин та суміжних ним сфер. Немає жодної потреби доводити, що цикл спорудження свердловин носить у вищій мірі комплексний характер, оскільки включає в себе вагому кількість технологічних операцій, укрупнено пов'язаних із необхідністю забезпечення означеного виробничого ланцюгу технічними засобами та технологічним оснащенням, а також відповідними інструментами і розмаїтими матеріалами.

Серед великого числа найбільш значущих, та таких, які мають стрижневий вплив на ефективність побудови систем розробки конкретного родовища, із якомога повним дотримання норм екологічної безпеки, відносяться операції зі здійснення очищення та кріплення (цементування) стовбура свердловини.

При реалізації операцій спорудження свердловин, пов'язаних із очищенням останньої за буріння, кріплення та цементування, використовують промивальні рідини (або за більш загальною назвою – бурові очисні агенти), що являють собою складні фізико-хімічні дисперсні системи, складові яких характеризуються сильно розвиненими поверхнями розділу фаз; вказане, власне, і визначає можливість ефективного здійснення, до прикладу, процесу руйнування гірського масиву, транспортування шламу з вибою свердловини на поверхню, закріплення нестійких стінок свердловини. Обґрунтований вибір типу промивальної рідини із певними технологічними показниками, який найбільш повно підходить до кожного конкретного випадку геолого-технічних умов буріння, повинен здійснюватися з урахуванням вимог щодо необхідності виконання своїх функцій свердловинним циркуляційним середовищем. Досягнути зазначеного можна, в тому числі, на підставі вивчення поведінки промивальних рідин при їх обробці спеціальними реагентами та активуванні для них окремих властивостей, причому, за дотримання екологічної безпеки.

Процеси кріплення і цементування свердловин можна класифікувати як набірні з численного ряду взаємопов'язаних робіт, скерованих на отримання надійного каналу зв'язку із земними надрами. Вони супроводжуються застосуванням промивальних, буферних а також тампонажних рідин або розчинів, які, внаслідок необхідності створення ними певних технологічних свердловинних характеристик та умов, повинні містити в своєму складі хімічні компоненти у вигляді, наприклад, поверхнево-активних речовин (ПАР). Такі речовини, окрім свого прямого призначення, в якості дієвих регулювальників властивостей оброблюваних середовищ, можуть проявляти схильність до впливу на оточуюче середовище на різних етапах свого застосування. Вказане повинно бути на принагідному рівні проаналізовано та потребує вжиття заходів для нівелювання впливу на кожному етапі спорудження свердловин.

Позначені питання перебувають в колі уваги фахівців Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», роботами яких показані шляхи вирішення конкретних питань підвищення технологічності та безпечності, з

позицій екологічної науки, отримання специфічних гірських виробок класу свердловин в гірському масиві.

Така складова процесу спорудження свердловини, як промивання вибою і стовбуру останньої, являється, без перебільшення, найвідповідальнішою операцією. Причому призначенням промивання є не лише класичне очищення вибою і стовбуру споруджуваної свердловини від частинок зруйнованої інструментом породи та його охолодження; воно значно ширше, а саме: запобігання порушення цілісності стінок стовбура свердловини та зменшення їх проникності шляхом утворення фільтраційних кірок; попередження надходження до свердловини нафти, газу та води (унеможливлення флюїдопроявів); змащування окремих свердловинних інструментів та деталей обладнання; утримання частинок розбуреної породи (шламу) у зваженому стані під час раптового припинення циркуляції; передача гідравлічної енергії турбобуру або гвинтовому двигуну та деякі інші. Виходячи зі змісту перелічених функцій промивальних рідин, до них пред'являються наступні обмежувальні вимоги: рідини не повинні чинити шкідливого впливу (корозія, абразивне зношування тощо) на бурильний інструмент та вибійні двигуни; рідини повинні легко прокачуватися та очищатися від шламу та газу; рідини повинні бути зручними в приготуванні та очищенні (регенерації) із метою їх повторного застосування в замкнутих системах циркуляції (рис. 4.6), а їх рецептури містити відносно не дорогі та не дефіцитні компоненти; рідини повинні бути безпечними при приготуванні та не чинити шкідливий вплив на навколишнє середовище.

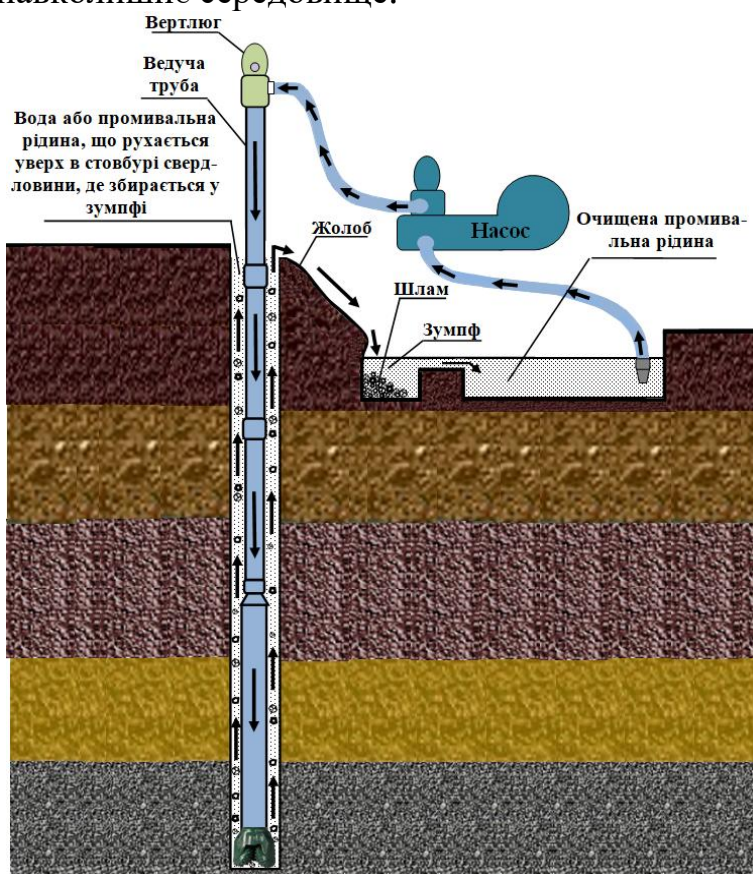


Рис. 4.6. Схематичне зображення замкнутої схеми циркуляції промивальної рідини на буровій ділянці

При обертальному бурінні нафтових та газових свердловин (і не тільки) у якості промивальних рідин можуть бути застосовані: очисні агенти на водній основі (технічна вода, природні промивальні рідини, а також глинисті та неглинисті промивальні рідини); очисні агенти на вуглеводневій основі та різноманітні емульсії; полімерні промивальні рідини.

Кріплення і наступне цементування завершених буріння свердловин, або їх окремих інтервалів, полягає в спуску металічної (в окремих випадках виготовленої з інших матеріалів) обсадної колони та закачуванні – в утворений зовнішніми стінками обсадних труб і стінками самої свердловини кільцевий простір – цементного (тампонажного) розчину, який згодом повинен трансформуватися в міцний монолітний цементний камінь.

До основних завдань (технологічних і екологічних), які необхідно виконати кріпленням і цементуванням стовбура свердловини, відносяться такі: зміцнення товщ нестійких гірських порід, ізоляція поглинаючих горизонтів, запобігання міжпластових перетікань флюїдів, створення каналу для транспортування корисних копалин від покладу до поверхні, захист обсадних труб від агресивного впливу пластових вод, запобігання деформації труб.

Найбільш часто звертаються до так званої прямої схеми цементування, за якої тампонажний розчин закачується всередину обсадної колони, після чого проводиться його витиснення у простір між колоною та стінками свердловини.

Виконання задач означених етапів спорудження свердловин – на якісно високому рівні – потребує спрямованого і послідовного застосування на різних їх стадіях спеціальних технологічних рідин (промивальні, буферні, тампонажні розчини тощо). Метою вказаного є досягнення досконалості робіт зі створення транспортного каналу, що не потребує наступного проведення додаткових ремонтно-виправних робіт, які є досить характерним явищем сучасної технології спорудження та експлуатації свердловин.

Спеціальні бурові технологічні рідини характеризуються складною багатокомпонентною хімічною структурою, до складу якої входять різноманітні активні сполуки; такі речовини створюються для виконання певних технологічних функцій – змащування і охолодження бурового інструменту, очищення вибою і стовбуру свердловини, стабілізації стінок свердловини тощо. Проте їхній хімічний склад часто містить поверхнево-активні речовини, інгібітори корозії, органічні розчинники та інші сполуки, що можуть бути токсичними або стійкими у навколишньому середовищі.

У разі потрапляння у ґрунт, воду чи атмосферу ці компоненти здатні змінювати природний хімічний баланс, спричиняти забруднення та негативно впливати на живі організми. Тому застосування спеціальних технологічних рідин потребує суворого контролю, розроблення систем очищення, утилізації та замкнених циклів їх використання для мінімізації шкоди довкіллю. Глинисті розчини (суспензії глини у воді) являються найпопулярнішими промивальними рідинами; їх отримують з порошкоподібних або комових глин у спеціальних пристроях (іноді розглядувані розчини утворюється в свердловині з розбурюваних глин). Глинисті промивальні рідини, на відміну від технічної води, відрізня-

няються наявністю для них підвищених показників в'язкості, що дозволяє їм ефективно транспортувати з вибою зруйновану інструментом гірську породу та суттєво знижувати або повністю виключати явище поглинання. Глинисті промивальні рідини, відповідної якості і властивостей, також здатні утворювати в стовбурі свердловини невеликої товщини ущільнений шар – фільтраційну кірку, що перешкоджає проникненню фільтрату в стінки свердловини – гірські породи, виключаючи таким чином їх активне насичення водою із відповідними негативними наслідками.

Таким чином, з наведених відомостей стає очевидним, що застосування різноманітних хімічних речовин при спорудженні свердловин є виробничо-необхідною мірою. Саме тому геолого-технічними проектами на спорудження свердловин необхідно передбачати екологічні попереджувальні заходи, спрямовані на запобігання забруднення всіх складових навколишнього природного середовища (грунтів, поверхневих і підземних вод, атмосферного повітря) промивальними рідинами і хімічними реагентами (ПАР).

Відносно раніше розглянутих техніко-технологічних аспектів, заходи з охорони навколишнього природного середовища повинні, окрім іншого, включати: відомості щодо застосування для зберігання відпрацьованих промивальних рідин земляних амбарів з обов'язковою гідроізоляцією їх стінок і днища, а також підготовку площадок-складів хімічних реагентів, поверхня яких повинна бути викладені залізобетонними плитами, що далеко не завжди виконується на буровій ділянці. Крім зазначеного, проектна документація на спорудження свердловин різного призначення, в обов'язковому порядку, повинна містити частини, в яких передбачено розгляд питань проведення ефективної рекультивації відведених під бурову ділянку земель (технічна і біологічна).

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 4

У процесі спорудження свердловин виникає широкий спектр екологічних проблем, пов'язаних із впливом на геологічне середовище, ґрунтово-рослинний покрив, водні ресурси та атмосферу. Будівництво свердловин, незалежно від їхнього призначення (пошукові, експлуатаційні, технічні, водозабірні тощо), супроводжується механічним порушенням природних структур, зміною гідро-геологічного режиму, накопиченням відходів буріння та потенційним ризиком забруднення навколишнього середовища техногенними речовинами.

1. Дослідження характеристик процесів порушення довкілля показало, що найбільший негативний вплив справляють бурові розчини, паливно-мастильні матеріали, відходи буріння, а також викиди пилу та газів у повітря; нерідко спостерігається забруднення поверхневих і підземних вод продуктами розкладу бурових реагентів, що може зумовлювати деградацію екосистем і втрату біорізноманіття на прилеглих територіях.

2. Впровадження природоохоронних технологій дозволяє суттєво знизити рівень техногенного навантаження; до таких технологій належать: використання екологічно безпечних бурових розчинів, систем очищення і повторного ви-

користання технологічних рідин, локалізація відходів у спеціальних сховищах, ущільнення бурових площадок, застосування герметизованого обладнання та сучасних систем моніторингу стану довкілля.

3. Основні вимоги до природоохоронних технологій полягають у забезпеченні мінімізації впливу на природні компоненти, недопущенні забруднення водних і ґрунтових ресурсів, зменшенні обсягів відходів і створенні умов для їх безпечної утилізації. Важливим елементом є також екологічне планування та оцінка впливу на довкілля на всіх етапах спорудження свердловини – від підготовчих робіт до ліквідації.

4. Ефективне вирішення екологічних проблем у сфері буріння потребує системного підходу, який поєднує технічні, організаційні та природоохоронні заходи. Рациональне використання природних ресурсів, впровадження інноваційних екотехнологій і дотримання екологічних стандартів є ключовими умовами сталого розвитку галузі та збереження екологічної рівноваги у регіонах бурових робіт.

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

Монографія, яку розглянуто, є комплексною науково-дослідною роботою, присвяченою аналізу процесів спорудження свердловин різного призначення. У ній розглянуто широкий спектр питань, що охоплюють як теоретичні основи, так і практичні аспекти буріння. Особливу увагу приділено дослідженню механізмів руйнування гірських порід, вдосконаленню технологій буріння, організації циркуляційних процесів технологічних рідин, а також питанням підвищення ефективності окремих процесів комплексного циклу спорудження свердловин. Крім того, у монографії проаналізовано екологічні наслідки процесів спорудження свердловин, визначено основні напрями мінімізації негативного впливу бурових робіт на навколишнє середовище та запропоновано шляхи впровадження природоохоронних технологій. Таким чином, робота поєднує науково-теоретичний, експериментальний і прикладний підходи, що дозволяє розглядати її як внесок у розвиток сучасних технологій буріння та забезпечення екологічної безпеки у галузі надрокористування.

Підсумовуючи проведене дослідження, доцільно наголосити на низці ключових висновків, що впливають із змісту монографії.

1. Доведено, що процес буріння свердловин є складною багатокomпонентною системою, де взаємодіють механічні, гідродинамічні, термічні та фізико-хімічні складові.

2. Встановлено, що на ефективність буріння впливають не лише параметри бурового обладнання, але й особливості геолого-технічних умов, структура гірського масиву, властивості промивальних рідин і точність дотримання режимів буріння; застосування у вказаних обставинах системного підходу дозволяє раціоналізувати всі елементи бурового процесу та забезпечити їх узгоджену взаємодію.

3. Встановлено, що ефективність руйнування порід залежить від виду енергії, що передається на вибій, типу бурового інструменту, властивостей порід (твердість, тріщинуватість, пластичність) і параметрів навантаження; розкрито закономірності передачі енергії від інструменту до гірського масиву та процесу формування мікротріщин, які визначають швидкість буріння.

4. Підвищення механічної швидкості можливе за рахунок раціоналізації режимних параметрів (осьове навантаження, частота обертання, кількість промивальної рідини), удосконалення конструкцій доліт, використання комбінованих способів впливу (механіко-гідравлічних, термомеханічних) і впровадження систем автоматизованого контролю; такі рішення забезпечують ефективніше використання енергії руйнування, зменшення зносу інструментів і підвищення продуктивності бурових робіт.

5. Встановлено, що циркуляція спеціальних технологічних рідин є основною умовою нормальної роботи бурової системи; від неї залежить очищення вибою від шламу, охолодження інструменту, стабілізація стінок свердловини та підтримання тиску в стовбурі.

6. Визначено, що раціональна організація циркуляційних процесів передбачає точний розрахунок гідравлічних параметрів, вибір складу та реологічних

властивостей промивальної рідини, що відповідають конкретним геолого-технічним умовам. Раціоналізація режимів циркуляції дозволяє знизити гідравлічні втрати, попередити обвали порід, уникнути ускладнень, пов'язаних із втратами циркуляції, і підвищити стабільність стовбура свердловини.

7. Встановлено, що підвищення енергоефективності процесу безпосередньо пов'язане зі зменшенням собівартості буріння, продовженням терміну служби обладнання та підвищенням загальної продуктивності бурової установки.

8. Досліджено екологічні наслідки бурових робіт і встановлено, що найбільшу небезпеку становлять відходи буріння, забруднення водного середовища буровими розчинами, викиди пилу та газів, а також порушення ґрунтового покриву. Розглянуто комплекс природоохоронних заходів, який включає: застосування екологічно безпечних промивальних рідин, замкнені системи циркуляції, локалізацію та переробку відходів, ущільнення бурових площадок, герметизацію обладнання та безперервний екологічний моніторинг. Реалізація цих заходів забезпечує зниження техногенного навантаження, збереження природних ресурсів і стабільність екосистем у районах буріння.

Слід підкреслити, що автори монографії визначили пріоритетним напрямом подальшого розвитку технології спорудження свердловин удосконалення методик проектування раціональної гідравлічної програми, яка забезпечує узгоджену роботу всіх елементів бурової установки. Такий підхід спрямований на створення ефективної взаємодії між параметрами циркуляції промивальних рідин, характеристиками гірських порід та технічними можливостями бурового обладнання. Це дозволяє мінімізувати гідравлічні втрати, стабілізувати тиск у стовбурі свердловини, підвищити ефективність очищення вибою та забезпечити енергоощадний режим роботи. Вказане відкриває можливості для підвищення продуктивності буріння, скорочення витрат, збільшення ресурсу інструментів і, головне, забезпечення безпечного та екологічно збалансованого освоєння надр.

Базою для виконання всіх дослідницьких робіт стало ґрунтовне вивчення широкого кола наукових і технічних джерел, присвячених питанням удосконалення циркуляційних процесів у свердловинах. Проаналізовані матеріали охоплюють результати фундаментальних досліджень, експериментальних робіт, а також практичний досвід провідних наукових установ і виробничих підприємств бурової галузі. Вказаний комплексний аналіз дозволив авторам систематизувати існуючі підходи до організації руху технологічних рідин, визначити недоліки традиційних схем і виявити напрями подальшого розвитку циркуляційних технологій. Особливу увагу приділено питанням раціоналізації гідравлічних параметрів, зниження енерговитрат, підвищення ефективності очищення вибою та забезпечення стабільності стовбура свердловини.

Перелічені напрацювання стали основою для формування нових інженерних рішень і методичних рекомендацій, спрямованих на підвищення надійності та ефективності бурових процесів. Узагальнений перелік прийнятих до уваги джерел представлено у списку використаної літератури, що відображає науково-методичну базу, на якій ґрунтуються результати проведених досліджень.

Розроблені в межах дослідження технічні та технологічні рішення можуть бути впроваджені на провідних об'єктах бурових робіт як на території України,

так і в інших країнах; їх практичне застосування забезпечує підвищення ефективності буріння, зниження енерговитрат, раціоналізацію циркуляційних процесів та покращення екологічних показників виробництва. Запропоновані підходи адаптовані до різних геолого-технічних умов і типів свердловин, що дозволяє використовувати їх у широкому спектрі робіт.

Висловлюється сподівання, що дана монографія стане цінним і практично корисним джерелом для науковців, інженерно-технічних фахівців і виробничого персоналу, діяльність яких пов'язана зі спорудженням свердловин різного призначення. Представлені матеріали можуть бути використані при розробленні нових технологічних рішень, оптимізації бурових процесів і підготовці спеціалістів у галузі буріння. Монографія також може слугувати навчально-методичною основою для студентів і аспірантів технічних університетів, які вивчають сучасні методи буріння, гідравліку промивальних систем і екологічні аспекти надрокористування.

Автори з вдячністю приймуть конструктивні зауваження, відгуки та пропозиції, спрямовані на подальше вдосконалення змісту, структури й практичної цінності монографії, адже розвиток галузі буріння потребує постійного оновлення наукових підходів і технологічних рішень.

Висловлюємо щирі подяку науковцям НТУ «Дніпровська політехніка», які надали всебічну підтримку під час виконання цієї роботи; їхні професійні поради, наукові зауваження та конструктивні рекомендації сприяли підвищенню наукового рівня, глибини аналізу та практичної значущості проведених досліджень. Особлива вдячність висловлюється колегам, які своєю науковою компетентністю, досвідом і доброзичливою участю допомогли у формуванні концепції, структури та змісту монографії; їхній внесок став важливим чинником успішного завершення дослідницької роботи.

СПИСОК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

- ОА – очисний агент (очисні агенти);
- ПР – промивальна рідина (промивальні рідини);
- БК – бурильна колона;
- ПРІ – породоруйнівний інструмент;
- БС – буровий снаряд;
- ПРБ – параметр режиму буріння;
- ГП – гірська (гірські) порода (породи);
- БН – буровий насос;
- ПРП – параметр (параметри) режиму промивання;
- БТ – бурильна труба (бурильні труби);
- СПО – спуско-підіймальні операції;
- ПАР – поверхнево-активна речовина (речовини);
- ОК – обсадна колона;
- ОТ – обсадна труба (труби);
- БУ – бурова установка;
- БІ – буровий інструмент (інструменти);
- ПАА – поліакриламід;
- ОБТ – обважені бурильні труби;
- ВПР – в'язко-пластична рідина.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Войтенко, В., & Вітрик, В. (2012). *Технологія і техніка буріння*. Центр Європи.
2. Павличенко, А., Коровяка, Є., & Ігнатов, А. (2023). *Дослідження гідравлічних основ циркуляції технологічних рідин*. НТУ "ДП".
3. Ouadfeul, S.-A., & Aliouane, L. (2020). *Oil and Gas Wells*. Publisher: IntechOpen.
4. Hossain, M., & Islam, M. (2018). *Drilling engineering: problems and solutions*. Scrivener publishing.
5. Павличенко, А., Ігнатов, А., & Аскеров, І. (2024). Аналіз впливу діяльності виробничих підприємств на природний стан ґрунтів. *Сталий розвиток: Виклики та реалії здійснення (Україна-Світ)* (с. 92–93). ІФНТУНГ.
6. Коровяка, Є., Хоменко, В., Винников, Ю., Харченко, М., & Расцветаєв, В. (2021). *Буріння свердловин*. НТУ "ДП".
7. Vaddadi, N. (2015). *Introduction to oil well drilling*. Bathos publishing.
8. Вирвїнський, П., Кузін, Ю., & Хоменко, В. (2010). *Геологорозвідувальна справа і техніка безпеки*. Національний гірничий університет.
9. Павличенко, А., Ігнатов, А., & Аскеров, І. (2024). Вивчення екологічнобезпечних факторів здійснення виробничих циклів в області видобувної галузі. *Геотехнічні проблеми розробки родовищ* (с. 79–83). Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України.
10. Jadhav, S. (2015). *Oil & Gas Production*. Publisher: Scitus Academics Llc.
11. Павличенко, А., Ігнатов, А., & Аскеров, І. (2024). Вплив деяких особливостей нафтогазовидобування на процеси зниження якості сільськогосподарських ґрунтів. *Open science nowadays: Main mission, trends and instruments, path and its development* (с. 351–355). Grail of science. <http://surl.li/hwzgdr>.
12. Коцкулич, Я., & Кочкодан, Я. (1999). *Буріння нафтових та газових свердловин*. Вік.
13. Robertson, J. O., & Chilingar, G. V. (2017). *Environmental Aspects of Oil and Gas Production*. John Wiley & Sons, Inc. <https://doi.org/10.1002/9781119117421>.
14. Patin, S. A. (1999). *Environmental impact of the offshore oil and gas industry*. EcoMonitor Pub.
15. Павличенко, А., Коровяка, Є., Марцинків, О., Ігнатов, А., Васильченко, Д., & Аскеров, І. (2024). Технологічні та екологічні ознаки циклу спорудження свердловин у методах вилуговування корисних копалин. *Збірник наукових праць НГУ*, (76), 206–218.
16. Ігнатов, А., Ставичний, Є., & Літвінов, В. (2024). Розгляд окремих питань свердловинних технологій вивчення властивостей гірських порід. *Інструментальне матеріалознавство*, (27), 56–69.
17. Ігнатов, А. (2024). Огляд складових гідромеханічного буріння з позицій інтенсифікації процесів руйнування гірської породи. *Інструментальне матеріалознавство*, (27), 39–49.
18. Ігнатов, А., Коровяка, Є., Літвінов, В., & Аскеров, І. (2024). Окремі питання колонкового способу буріння свердловин. *Débats scientifiques et orientations prospectives du développement scientifique*. European Scientific Platform. <https://doi.org/10.36074/logos-01.03.2024.040>.
19. Ігнатов, А., & Літвінов, В. (2024). Шляхи удосконалення технічних засобів відбору керну при спорудженні різних типів свердловин. *Геотехнічні проблеми розробки родовищ* (с. 58–60). Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України.
20. Azar, J. J., & Samuel, G. R. (2007). *Drilling Engineering*. PennWell Corp.
21. Islam, M. R., & Hossain, M. E. (2020). *Drilling Engineering*. Publisher: Elsevier Science & Technology Books. ISBN: 9780128201930.
22. Павличенко, А., Ігнатов, А., & Аскеров, І. (2024). Техніко-технологічні особливості ударних машин для буріння свердловин. *Інструментальне матеріалознавство*, (27), 88–99.
23. Ihnatov, A. (2021). Analyzing mechanics of rock breaking under conditions of hydromechanical drilling. *Mining of Mineral Deposits*, 15(3), 122–129.
24. Дудля, М. (2011). *Промивальні рідини в бурінні*. Державний ВНЗ "Національний гірничий університет".

25. Павличенко, А., Ігнатов, А., Коровяка, Є., Барташевський, С., Коротка, І., & Мекшун, М. (2021). Основи організації системи гідравлічного очищення свердловин. *Збірник наукових праць НТУ*, (67), 136–152.
26. Dalal, M. (2018). *Physical Chemistry*. Publisher: Dalal Institute.
27. Koroviaka, Y. A., Stavychnyi, Y. M., Martsynkiv, O. B., Ihnatov, A. O., & Yavorskyi, A. V. (2024). Research on occurrence features and ways to improve the quality of productive hydrocarbon horizons demarcation. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (3), 5–11. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2024-3/005>.
28. Aziukovskyi, O., Ihnatov, A., & Stavychnyi, Y. (2022). Improving the properties of special downhole fluids in field development. *Scientific papers of DonNTU Series: "The Mining and Geology"*, (1(27)-2(28)2022), 96–106. [https://doi.org/10.31474/2073-9575-2022-1\(27\)-2\(28\)-96-106](https://doi.org/10.31474/2073-9575-2022-1(27)-2(28)-96-106).
29. Ігнатов, А., & Ставичний, Є. (2020). Лабораторні та промислові дослідження процесу цементування нафтогазових свердловин в умовах товщ осадових порід. *Інструментальне матеріалознавство*, (23), 88–103.
30. Ставичний, Є., & Ігнатов, А. (2019). Особливості кріплення стовбура свердловини у хомогенних відкладах. *Porodorazrushaiushchyi y metalloobrabatyvaiushchyi ynstrument-tekhnyka y tekhnolohyia eho yzghotovleniya y prymeneniya*, (22), 164–174.
31. Ihnatov, A. O., Haddad, J., Stavychnyi, Y. M., & Plytus, M. M. (2022). Development and Implementation of Innovative Approaches to Fixing Wells in Difficult Conditions. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series D*. <https://doi.org/10.1007/s40033-022-00402-5>.
32. Павличенко, А., Коровяка, Є., Ігнатов, А., & Давиденко, О. (2021). Гідрогазодинамічні процеси при спорудженні та експлуатації свердловин. НТУ "ДП".
33. Коцкулич, Я., & Тищенко, О. (2004). *Закінчування свердловин*. Інтерпрес ЛТД.
34. Павличенко, А., Ігнатов, А., & Ставичний, Є. (2023). Особливості техніко-технологічного супроводження операцій кріплення та цементування свердловин. *Інструментальне матеріалознавство*, (26), 80–92.
35. Ігнатов, А. О., & Ставичний, Є. (2022). Деякі питання технологій промивання та кріплення свердловин у складних умовах. *Інструментальне матеріалознавство*, (25), 119–132.
36. Ігнатов, А., & Ставичний, Є. (2021). Геологічні й техніко-технологічні особливості кріплення нафтогазових свердловин з урахуванням фізико-хімічного стану їх стовбурів. *Інструментальне матеріалознавство*, (24), 87–102.
37. Skalle, P. (2015). *Drilling fluid engineering*. Publisher: bookboon.com isbn 978-87-403-1139-6.
38. Modi, P., & Seth, S. (2004). *Fluid mechanics and hydraulic machines*. Standard Book House.
39. Чудик, І., Богославець, В., & Дудич, І. (2016). Біополімер-силікатний буровий розчин для буріння горизонтальних свердловин. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*, 4(61), 34–42.
40. Speight, J. G. (2018). *Formulas and Calculations for Drilling Operations*. Wiley & Sons, Limited, John.
41. Pavlychenko, A. V., Ihnatov, A. O., Koroviaka, Y. A., Ratov, B. T., & Zakenov, S. T. (2022). Problematics of the issues concerning development of energy-saving and environmentally efficient technologies of well construction. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1049(1), 012031. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1049/1/012031>.
42. Ihnatov, A. O., Koroviaka, Y. A., Pinka, J., Rastsvietaiev, V. O., & Dmytruk, O. O. (2021). Geological and mining-engineering peculiarities of implementation of hydromechanical drilling principles. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (1), 11–18. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-1/011>
43. Ihnatov, A., Koroviaka, Y., Rastsvietaiev, V., & Tokar, L. (2021). Development of the rational bottomhole assemblies of the directed well drilling. *E3S Web of Conferences*, 230, 01016. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202123001016>.

44. Ігнатов, А. О. (2020). До питання визначення вибійних робочих характеристик пристроїв гідромеханічного буріння. *Інструментальне матеріалознавство*, (23), 78–88.
45. Ihnatov, A. O., Koroviaka, Y. A., Haddad, J., Tershak, B. A., Kaliuzhna, T. M., & Yavorska, V. V. (2022). Experimental and theoretical studies on the operating parameters of hydromechanical drilling. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (1), 20–27. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-1/020>.
46. Пашенко, О., Ігнатов, А., & Владико, О. (2021). Деякі особливості руйнування гірського масиву на вибої свердловини. *Інструментальне матеріалознавство*, (24), 121–134.
47. Ігнатов, А., Пашенко, О., Коровяка, Є., Семехін, В., Логвиненко, О., & Аскеров, І. (2021). Деякі пояснення ударного механізму впливу на гірські породи при бурінні свердловин. *Збірник наукових праць національного гірничого університету*, (66), 177–192.
48. Pavlychenko, A., Ihnatov, A., & Askerov, I. (2022). Ways to intensify downhole processes of rock destruction during well construction. *Scientific papers of donntu series: "The Mining and Geology"*, (1(27)-2(28)2022), 87–95. [https://doi.org/10.31474/2073-9575-2022-1\(27\)-2\(28\)-87-95](https://doi.org/10.31474/2073-9575-2022-1(27)-2(28)-87-95).
49. Lopez, J.C., Lopez, J. E., & Javier, F. (2017). *Drilling and blasting of rocks*. CRC Press Taylor & Francis.
50. Sharma, K.K. & Sharma, L.K. (2016). *Physical Chemistry*. Publisher: Vikas Publishing.
51. Bahl, B., Tuli, G., & Bahl, A. (2000). *Essentials of Physical Chemistry*. S Chand & Co.
52. Давиденко, О. М., & Ігнатов, А. О. (2019). Механіка ефективного руйнування гірських порід шарошково-ланцюговими долотами. *Інструментальне матеріалознавство*, (22), 148–157.
53. Коровяка, Є., Ігнатов, А., Давиденко, О., & Мекшун, М. (2023). Аналіз деяких властивостей промивальних рідин та їх впливу на показники процесу буріння свердловин. *Інструментальне матеріалознавство*, (26), 58–68.
54. Чудик, І., Дудич, І., & Токарук, В. (2020). Моделювання процесу промивання свердловин. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*, 2(75), 62–68.
55. Koroviaka, Y. A., Mekshun, M. R., Ihnatov, A. O., Ratov, B. T., Tkachenko, Y. S., & Stavychnyi, Y. M. (2023). Determining technological properties of drilling muds. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (2), 25–32. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-2/025>.
56. Коровяка, Є., & Ігнатов, А. (2020). *Прогресивні технології спорудження свердловин*. НТУ «ДП».
57. Zhang, Z.-X. (2016). *Rock Fracture and Blasting: Theory and Applications*. Elsevier Science & Technology Books.
58. Mukerji, T., Dvorkin, J., & Mavko, G. (2019). *Rock Physics Handbook*. Cambridge University Press.
59. Guéguen, Y. (1994). *Introduction to the physics of rocks*. Princeton University Press.
60. Gatlin, C. (1960). *Petroleum Engineering: Drilling and Well Completions*. Prentice-Hall, INC, Englewood Cliffs, N.J.
61. Ігнатов, А. О. (2015). *Пристрій для буріння* (Патент України № 109273). Український інститут інтелектуальної власності.
62. Ігнатов, А. О. (2016). *Пристрій для дробового буріння* (Патент України № 111350). Український інститут інтелектуальної власності.
63. Ігнатов, А. О. (2023). Визначення змісту окремих складових технологічного процесу гідромеханічного буріння свердловин. *Інструментальне матеріалознавство*, (26), 39–49.
64. Gabolde, G., & Nguyen, J.P. (2006). *Drilling*. Editions Technips publishing.
65. Мислюк, М., Рибич, І., & Яремійчук, Р. (2004). *Буріння свердловин: Довідник: у 5 т. Т. 3: Вертикальне та скероване буріння*. Інтерпрес ЛТД.
66. Nguyen, J.P. (1996). *Drilling. Oil and Gas Field Development Techniques*. Editions Technips publishing.
67. Ігнатов, А. О., & Вяткін, С. С. (2013). *Кулеструминний пристрій для буріння свердловин* (Патент України № 102707). Український інститут інтелектуальної власності.

68. Ігнатів, А. О., & Вяткін, С. С. (2013). *Кулеструмінний пристрій для буріння свердловин* (Патент України № 102708). Український інститут інтелектуальної власності.
69. Robello, S.G., & Xiushan, L. (2009). *Advanced drilling engineering*. Gulf Publishing Company.
70. Ігнатів, А. О. (2021). Встановлення базових принципів функціонування окремих вузлів пристроїв гідро(пневно)механічного буріння. *Інструментальне матеріалознавство*, (24), 76–87.
71. Guan, Z., Chen, T., & Liao, H. (2021). *Theory and Technology of Drilling Engineering*. Springer Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-15-9327-7>.
72. Bansal, R. K. (2005). *A Textbook of Strength of Materials*. Laxmi Publications.
73. Carmichael, R. S. (2017). *Practical Handbook of Physical Properties of Rocks and Minerals (1988)*. Taylor & Francis Group.
74. Ігнатів, А. (2022). Дослідження технологічних особливостей реалізації гідромеханічного способу буріння. *Інструментальне матеріалознавство*, (25), 53–65.
75. Schreiber, E., & Liebermann, R. C. (1994). *Experimental Techniques in Mineral and Rock Physics: The Schreiber Volume*. Birkhauser.
76. Гурський, Д., Єсипчук, К., & Калінін, В. (2006). *Металічні корисні копалини України*. Центр Європи.
77. Caenn, R., Gray, G., & Darley, H. (2020). *Composition and Properties of Drilling and Completion Fluids*. Publisher: Gulf Professional Publishing.
78. Milap, G. (2017). *Mud Engineering Simplified*. Publisher: BecomeShakespeare.com.
79. Davydenko, O., & Ihnatov, A. (2020). Research into influence of filtrate mud liquids on rocks swelling processes. *Tooling materials science*, (23), 36–49.
80. Austin, E.H. (2012). *Drilling Engineering*. Publisher: Springer Science & Business Media.
81. Ouadfeul, S.-A., & Aliouane, L. (Ред.). (2020). *Oil and Gas Wells*. IntechOpen.
82. Aziukovskyi, O., Koroviaka, Y., & Ihnatov, A. (2023). *Drilling and operation of oil and gas wells in difficult conditions*. Zhurfond.
83. Jeffery, W.H. (2015). *Deep Well Drilling: The Principles and Practices of Deep Well Drilling*. Publisher: Palala Press.
84. Tahir, M. B., Sagir, M., Mushtaq, M., Tahir, M. S., & Shaik, A. R. (2020). *Surfactants for Enhanced Oil Recovery Applications*. Springer.
85. Atkins. (2010). *Physical Chemistry (Sale Fcc)*. Freeman & Company, W. H.
86. Bansal, R.K. (2010). *Hydraulics and fluid mechanics*. Laxmi Publications LTD.
87. Kumar, D.S. (2009). *Fluid mechanics and fluid power engineering*. Publisher: S K Kataria and Sons.
88. Вамболь, С., Міщенко, І., & Кондратенко, О. (2016). *Технічна механіка рідини і газу*. НУЦЗУ.
89. Коровяка, Є., & Ігнатів, А. (2020). Особливості гідротранспорту знімних кернаприймачів. *Tooling materials science*, (23), 103–114.
90. Speight, J. G. (2013). *Heavy Oil Production Processes*. Elsevier Science & Technology Books.
91. Looyeh, R., & Aadnoy, B. (2011). *Petroleum Rock Mechanics: Drilling Operations and Well Design*. Elsevier Science & Technology Books.
92. Davidenko, A., & Ighnatov, A. (2016). Basic results of researches of lining and plugging processes at wells construction. *Metallurgical and Mining Industry*, 9, 58–64.
93. Ping, W.L. (2016). *Foam drilling cycle theory and practice*. Publisher: Petroleum Industry Press.
94. Terry, R.E., Rogers, J.B., & Craft, B.C. (2014). *Applied Petroleum Reservoir Engineering*. Publisher: Prentice Hall.
95. Папушин, Ю., Смирнов, В., & Білецький, В. (2006). *Дослідження корисних копалин на збагачуваність*. Східний видавничий дім.
96. Коровяка, Є., Ігнатів, А., & Расцветаєв, В. (2021). Особливості бурових робіт при інженерних вишукуваннях і підготовці територій. *Інструментальне матеріалознавство*, (24), 102–113.

97. Guhey, R. (2017). *Geology*. Publisher: Imprint NIPA.
98. Haldar, S. K. (2013). *Introduction to Mineralogy and Petrology*. Elsevier.
99. Ihnatov, A. (2021). Hydraulic programme of well shaft cleaning as a factor of accident-free process of shaft sinking. *Promising scientific researches of Eurasian scholars*.
100. Caenn, R., Gray, G., & Darley, H. (2020). *Composition and Properties of Drilling and Completion Fluids*. Publisher: Gulf Professional Publishing.
101. Hatami, M. J. (2017). *Oilfield Survival Guide, Volume One: For All Oilfield Situations*. Oilfield Books, LLC.
102. Fink, J. (2003). *Oil Field Chemicals*. Gulf Professional Publishing.
103. Haghi, A. K. (2020). *Physical Chemistry and Its Interdisciplinary Applications*. Nova Science Publishers, Incorporated.
104. Давиденко, О. М., Ігнатів, А. О., & Науменко, М. О. (2018). Вивчення стану обсадної колони при цементуванні свердловин. *Інструментальне матеріалознавство*, (21), 113–119.
105. Ставичний, Є. М., Фем'як, Я. М., Тершак, Б. А., Ігнатів, А. О., Рибачук, С. А., Бочкур, Ю. В., & Савчук, Н. М. (2023). Сучасне вітчизняне технологічне обладнання для кріплення свердловин хвостовиками з колоною-фільтром. *Prospecting and Development of Oil and Gas Fields*, (1(86)), 54–63. [https://doi.org/10.31471/1993-9973-2023-1\(86\)-54-63](https://doi.org/10.31471/1993-9973-2023-1(86)-54-63).
106. Павличенко, А., Ігнатів, А., Коровяка, Є. А., & Аскеров, І. К. (2023). Основні техніко-технологічні та екологічні аспекти спорудження експлуатаційних свердловин. *Інструментальне матеріалознавство*, (26), 68–79.
107. Ihnatov, A., Pavlychenko, A., Kostrytska, S., & Askerov, I. (2024). Technological and environmental basis for the construction of water wells. *Education and science of today: Intersectoral issues and development of sciences*. European Scientific Platform. <https://doi.org/10.36074/logos-29.03.2024.058>.
108. Павличенко, А., Ігнатів, А., & Аскеров, І. (2024). Питання забезпечення агрономічної якості ґрунтів при свердловинній меліорації. *Ricerche scientifiche e metodi della loro realizzazione: Esperienza mondiale e realtà domestiche* (с. 106–111). Associazione Italiana di Storia Urbana / UKRLOGOS Group. <http://surl.li/ххуууу>.
109. Мислюк, М., Рибич, І., & Яремійчук, Р. (2004). Буріння свердловин. *Довідник: у 5 т. Т. 5: Ускладнення. Аварії. Екологія*. Інтерпрес ЛТД.
110. Павличенко, А., Ігнатів, А., & Аскеров, І. (2024). Проблематика збереження родючих ґрунтів при спорудженні свердловин. *Diversity and inclusion in scientific area* (с. 222–225).
111. Napich, H., Andrieiev, V., Kovalenko, V., Hrytsan, Y., & Pavlychenko, A. (2022). Study of fragmentation impact of small riverbeds by artificial waters on the quality of water resources. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (3), 185–189. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-3/185>.
112. Колесник, В., Павличенко, А., & Бучавий, Ю. (2018). Уніфікована методика комплексного оцінювання рівня екологічної небезпеки промислових об'єктів та технологій. *Техногенно-екологічна безпека*, 3(1), 64–69.
113. Buzylo, V., Pavlychenko, A., & Borysovska, O. (2020). Ecological aspects of filling of worked-out area during underground coal mining. *E3S Web of Conferences*, 201, 01038. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020101038>.
114. Pavlychenko, A. (2020). Forecasting of atmospheric air pollution rates from drilling and blasting operations on iron mining quarries. *Collection of Research Papers of the National Mining University*, 61, 129–142. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/61.129>.
115. Адаменко, О., & Рудько, Г. (1997). *Екологічна геологія*. Манускрипт.
116. Гошовський, С., Рудько, Г., & Преснер, Б. (2002). *Екологічна безпека техногенних геосистем у зв'язку з катастрофічним розвитком геологічних процесів*. ЗАТ “НІЧЛАВА”.
117. Robertson, J. O., & Chilingar, G. V. (2017). *Environmental Aspects of Oil and Gas Production*. John Wiley & Sons, Inc. <https://doi.org/10.1002/9781119117421>.
118. Patin, S. A. (1999). *Environmental impact of the offshore oil and gas industry*. EcoMonitor Pub.

Наукове видання

Павличенко Артем Володимирович
Коровяка Євгеній Анатолійович
Ігнатов Андрій Олександрович

**ТЕХНОЛОГІЧНІ ТА ЕКОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ОКРЕМИХ ОПЕРАЦІЙ
ПРОЦЕСУ СПОРУДЖЕННЯ СВЕРДЛОВИН**

Монографія

Видано в редакції авторів.

ПАВЛИЧЕНКО Артем Володимирович - доктор технічних наук, професор, лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки, перший проректор Національного технічного університету «Дніпровська політехніка».

Наукова діяльність присвячена питанням створення екологічно безпечних технологічних процесів та устаткування, що забезпечують раціональне використання природних ресурсів на гірничодобувних підприємствах.

Автор 15 навчальних посібників та монографій, 18 патентів на винаходи та корисні моделі, понад 210 наукових і навчально-методичних праць.



КОРОВЯКА Євгеній Анатолійович - кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри нафтогазової інженерії та буріння Національного технічного університету «Дніпровська політехніка».

Наукова діяльність присвячена питанням спорудження нафтогазових свердловин, проблемам видобутку та транспортування вуглеводневих енергоносіїв, зокрема газу метановугільних родовищ.

Автор 8 монографій, 11 навчальних посібників, 32 патентів на винаходи та корисні моделі, понад 270 наукових та навчально-методичних праць.

ІГНАТОВ Андрій Олександрович - кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри нафтогазової інженерії та буріння Національного технічного університету «Дніпровська політехніка».

Наукова діяльність присвячена вивченню питань взаємодії потоку очисного агента із продуктами руйнування, обґрунтуванню нових конструкцій бурових доліт та методів кріплення свердловин, розробці основ абразивно-механічного ударного способу буріння.

Автор 10 навчальних посібників та монографій, 46 патентів на винаходи та корисні моделі, понад 220 наукових та навчально-методичних праць.

