



А.В. Павличенко

Є.А. Коровяка

А.О. Ігнатов

ДОСЛІДЖЕННЯ

ГІДРАВЛІЧНИХ ОСНОВ ЦИРКУЛЯЦІЇ

ТЕХНОЛОГІЧНИХ РІДИН



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



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

ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРАВЛІЧНИХ ОСНОВ ЦИРКУЛЯЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНИХ
РІДИН

Монографія

Дніпро
Журфонд
2023

УДК 622.244.4

П12

Затверджено до видання вченою радою НТУ «Дніпровська політехніка», як монографія для фахівців і студентів спеціальностей 184 «Гірництво» та 185 «Нафтогазова інженерія та технології» (протокол № 6 від 06.05.2023).

Рецензенти:

І.В. Воєвідко – 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»;

М.С. Четверик – доктор технічних наук, професор, провідний науковий співробітник відділу геомеханічних основ відкритої розробки родовищ Інституту геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова Національної академії наук України.

Павличенко А.В.

П12 Дослідження гідравлічних основ циркуляції технологічних рідин: монографія / А.В. Павличенко, Є.А. Коровяка, А.О. Ігнатов; М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». – Дніпро: Журфонд, 2023. – 212 с.

DOI: 10.33271/DUT.004

В роботі розглянуто наступні змістові модулі: стан та перспективи розвитку технології буріння свердловин із застосуванням різних схем циркуляції очисного агента та рецептур останніх; комплексні критерії, що визначають раціональну витрату очисного агента; сутність поверхневих та об'ємних фізико-хімічних явищ при протіканні циркуляційних процесів у свердловинах; фактори впливу промивальних рідин на фізико-механічні властивості гірських порід та процеси вибійного руйнування в цілому; взаємозв'язок між фізико-геометричними характеристиками продуктів руйнування та циркуляційними процесами на вибої та у стовбурі свердловини.

Призначена для фахівців, які займаються буровими роботами, а також буде корисна студентам технічних вузів, зокрема нафтогазового і геологорозвідувального профілів.

Видано в редакції авторів.

ISBN 978-966-934-535-6

© А.В. Павличенко, Є.А. Коровяка,
А.О. Ігнатов, 2023

© Національний технічний університет
«Дніпровська політехніка», 2023

ЗМІСТ МОНОГРАФІЇ

	Вступ.....	2
<u>Розділ 1</u>	<u>Сучасний стан і перспективи розвитку способів буріння свердловин із застосуванням різних схем циркуляції очисного агента.....</u>	7
<u>1.1</u>	Особливості процесів транспортування продуктів руйнування за прямої схеми циркуляції очисного агента.....	7
<u>1.2</u>	Основні вимоги до якості очищення стовбура та вибою свердловини та фактори, що визначають їх чистоту.....	13
<u>1.3</u>	Техніко-технологічна характеристика способу буріння свердловин із зворотною схемою циркуляції очисного агента.....	27
<u>1.4</u>	Деякі основоположні питання розробки та обґрунтування раціональних рецептур очисних агентів.....	34
	Загальні висновки до розділу 1.....	39
<u>Розділ 2</u>	<u>Проблематика процесів взаємодії продуктів руйнування з потоком очисного агента.....</u>	41
<u>2.1</u>	Дослідження гранулометричного складу продуктів руйнування (шламу) бурових свердловин.....	41
<u>2.2</u>	Визначення умов та закономірностей руху частинок продуктів руйнування гірських порід (шламу) за буріння свердловин.....	46
<u>2.3</u>	Визначення деяких закономірностей відносного руху керну.....	53
<u>2.4</u>	Деякі експериментальні відомості про рух керну по подвійній бурильній колоні.....	56
	Загальні висновки до розділу 2.....	58
<u>Розділ 3</u>	<u>Характеристика основних критеріїв, що визначають раціональну витрату очисного агента.....</u>	59
<u>3.1</u>	Вплив форми та розмірів частинок шламу гірських порід на швидкість їх руху в рідині (очисному агенті).....	59
<u>3.2</u>	Вивчення особливостей підходів до порядку визначення витрати очисного агента при спорудженні свердловин.....	64
	Загальні висновки до розділу 3.....	72
<u>Розділ 4</u>	<u>Вивчення деяких закономірностей руху зразків гірської породи (кернів) при циркуляції ньютонівської рідини.....</u>	73
<u>4.1</u>	Особливості характеру впливу складових перепаду тиску в бурильній колоні на транспортування керну.....	73
<u>4.2</u>	Визначення залежності швидкості руху керну від геометричних розмірів транспортного каналу та його фізико-геометричних параметрів.....	82
	Загальні висновки до розділу 4.....	85
<u>Розділ 5</u>	<u>Відмітні ознаки особливостей руху кернів при циркуляції в'язко-пластичної промивальної рідини.....</u>	86
<u>5.1</u>	Аналіз складових процесу транспортування зразків породи у вигляді керну при циркуляції в'язко-пластичної промивальної рідини.....	86

<u>5.2</u>	Характер впливу геометричних розмірів транспортного каналу подвійної бурильної колони, лінійних та фізико-механічних параметрів керна на швидкість його руху.....	91
	Загальні висновки до розділу 5.....	95
<u>Розділ 6</u>	<u>Вплив циркуляційних середовищ на механізм руйнування гірських порід при різних способах буріння.....</u>	96
<u>6.1</u>	Деякі загальні питання фізики руйнування гірських порід.....	96
<u>6.2</u>	Сутність методів дослідження процесу руйнування гірських порід та його енергоємності.....	100
	Загальні висновки до розділу 6.....	117
<u>Розділ 7</u>	<u>Деякі аспекти абразивно-механічного ударного буріння в умовах дії гідростатичного тиску.....</u>	118
<u>7.1</u>	Вивчення теоретичних основ процесу абразивно-механічного руйнування гірських порід відповідними буровими снарядами.	118
<u>7.2</u>	Деякі положення методики визначення впливу гідростатичного тиску на ефективність руйнування гірських порід.....	125
	Загальні висновки до розділу 7.....	131
<u>Розділ 8</u>	<u>Дослідження поверхневих та об'ємних фізико-хімічних явищ при протіканні циркуляційних процесів у свердловині.....</u>	132
<u>8.1</u>	Об'єкт та методика проведення досліджень.....	132
<u>8.2</u>	Експериментально-теоретичні дослідження адсорбційної здатності гірських порід.....	134
	Загальні висновки до розділу 8.....	150
<u>Розділ 9</u>	<u>Дослідження впливу промивальних рідин на фізико-механічні властивості гірських порід.....</u>	151
<u>9.1</u>	Дослідження впливу середовища на розподіл напруження у твердому тілі при його зосередженому навантаженні.....	151
<u>9.2</u>	Дослідження впливу органічних сполук та ПАР на міцність гірських порід.....	158
	Загальні висновки до розділу 9.....	177
<u>Розділ 10</u>	<u>Дослідження мастильних і протизносних властивостей циркулюючих промивальних рідин. Деякі аспекти екології при бурінні свердловин.....</u>	178
<u>10.1</u>	Промивальні рідини з покращеними мастильними властивостями.....	178
<u>10.2</u>	Дослідження протизношувальних властивостей промивальних рідин.....	186
<u>10.3</u>	Дослідження корозійної дії циркулюючих промивальних рідин при бурінні свердловин.....	188
<u>10.4</u>	Екологічні питання буріння свердловин.....	192
	Загальні висновки до розділу 10.....	199
	Висновки та рекомендації.....	200
	Список умовних скорочень.....	202
	Список літератури.....	203

ВСТУП

Науково-практичний доробок – монографія, що перед вами, являється ґрунтовною роботою, присвяченою вивченню комплексних питань реалізації обов'язково необхідних циркуляційних процесів при спорудженні (зокрема бурінні) та експлуатації свердловин різного призначення (відповідно до класу корисної копалини) в складних геолого-технічних умовах із обов'язковим дотриманням певних екологічних норм та відповідних обмежень.

Відомо, що основною задачею отримання специфічних гірських виробок класу бурових свердловин, є з'єднання продуктивного пласта (який містить вуглеводні, воду, або інші корисні рідкі, тверді та газоподібні компоненти) з денною поверхнею герметичним, міцним, екологічнобезпечним і довговічним експлуатаційним каналом при мінімальних витратах; у разі виконання геологорозвідувальних робіт – мова повинна йти про необхідність отримання якісних зразків гірської породи або, безпосередньо, геологічного скупчення певних компонентів. Тут необхідно також відмітити, що можливість ефективної розробки вуглеводневих родовищ базується на необхідності одержання чітких і зрозумілих відомостей про геометричні розміри (площа та потужність) продуктивних горизонтів, термобаричні умови їх залягання, колекторські властивості та ступінь нафтогазонасичення продуктивних пластів.

Потенційна продуктивність і ефективність виконання окремих складових процесу буріння залежить від цілого комплексу взаємопов'язаних чинників та визначається реалізованими значеннями осьового навантаження на породоруйнівний інструмент (для умов експлуатаційного буріння це будуть бурові долота, геологорозвідувального – бурові коронки, колонкові долота), частоти обертання останнього, витрати промивальної рідини і параметрів її якості. Складні свердловинні умови роботи інструменту (породоруйнівний інструмент, бурильні труби тощо) і наземного обладнання при бурінні та експлуатації свердловин, особливо при ліквідації ускладнень (утруднення поглиблення свердловини, викликане порушенням її стану) і аварій в свердловинах, висувають низку специфічних вимог до порядку ведення бурових робіт із дотриманням відповідних технологічних, а також екологічних норм.

Вибір прийняттого способу буріння в різних інтервалах свердловини ґрунтується на необхідності детального вивчення її конструкції, геолого-технічних умов спорудження свердловин та аналізі техніко-економічних показників процесів спорудження свердловин. Головним критерієм раціональності способу буріння можна вважати мінімальну собівартість одиниці довжини проходки за повного виключення прояву ускладнень і аварій.

Доволі вдалим способом значного підвищення техніко-економічних показників процесів спорудження свердловин, в даному випадку механічної швидкості буріння, є застосування прогресивного бурового інструменту та технологій. При високій зносостійкості сучасних конструкцій бурових доліт, довжина рейсу в процесі буріння свердловин обмежується необхідністю витягання зі свердловини якісного і в необхідній кількості керна. Тут прогресивним шляхом зменшення кількості спуско-підйомів бурового снаряда, а, отже, і часу, який на них витрачається, є буріння снарядами з так званими

знімними ґрунтоносками (сюди також можна віднести і прийоми гідравлічного транспортування кернових зразків), які забезпечують можливість витягання керна по колоні бурильних труб без її розбору та підйому на поверхню.

Ефективність буріння в складних гірничо-геологічних умовах багато в чому буде залежати від якісної очистки вибою свердловини і самої промивальної рідини від шламу. Цим питанням присвячено велику кількість робіт, в яких основна увага приділяється встановленню необхідної швидкості висхідного потоку, що забезпечує винос частинок вибуреної породи (фрагментів гірського масиву). Вплив промивальних рідин на фізико-механічні властивості і процеси руйнування порід, 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. Лабораторними методами досліджень можна вивчити сутність процесів, що протікають на межі розділу «тверде тіло - рідина». Цими методами 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. Залежно від хімічної структури компонентів взаємодіючих систем, між молекулами адсорбата і поверхнею адсорбенту можуть виникати зв'язки різних типів. Проведеними дослідженнями переконливо показано, що показники якості промивальних рідин істотно змінюються під впливом деяких поверхнево-активних речовин, а це обумовлює необхідність попередньої, лабораторної розробки рецептур і способів приготування промивальних рідин з потребою врахування якості глинистих порошоків і хімічної природи застосовуваних для обробки рідин поверхнево-активних речовин.

Науково і практично доведеним є наступне: пониження міцності твердих тіл може бути досягнуто за рахунок зменшення їх поверхневої енергії у спосіб, що ґрунтується на адсорбційній взаємодії контактуючих поверхонь розділу.

Таким чином, враховуючи деякі виключення, можна обґрунтовано стверджувати, що нині застосовувані в процесах спорудження свердловин очисні агенти, являють собою комплексні з фізичної та хімічної точок зору дисперсні системи; останні відрізняє сильно розвинена для них поверхня розділу фаз, що, власне, і визначає всю гаму їх різноманітних властивостей стосовно: виконання ролі циркуляційного середовища, в якому протікають процеси руйнування гірських порід; забезпечення раціональних умов відпрацювання бурового обладнання та породоруйнівних інструментів; потенційного досягнення максимальних показників механічної та рейсової швидкості поглиблення вибою свердловини; докорінного або часткового усунення передумов виникнення різного роду ускладнень та наступних ним аварій в стовбурі свердловини.

Представлені матеріали є не тільки оригінальними роботами авторів, вони так само відображають загальні тенденції розвитку вчень про фізико-хімічні основи свердловинних циркуляційних процесів, що розвиваються провідними дослідниками, із вдячністю згаданими в списку літератури та процитованими в окремих рубриках пропонованої до розгляду читачеві наукової роботи.

РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН І ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ СПОСОБІВ БУРІННЯ СВЕРДЛОВИН ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ РІЗНИХ СХЕМ ЦИРКУЛЯЦІЇ ОЧИСНОГО АГЕНТА

1.1 Особливості процесів транспортування продуктів руйнування за прямої схеми циркуляції очисного агента

Процеси спорудження свердловин різнопланові [1], проте серед їх великої кількості можна виділити декілька фундаментальних, а саме: руйнування гірського масиву та видалення зруйнованої породи з вибою і стовбуру розглядуваної специфічної виробки – здебільшого, за допомогою промивальних рідин (ПР).

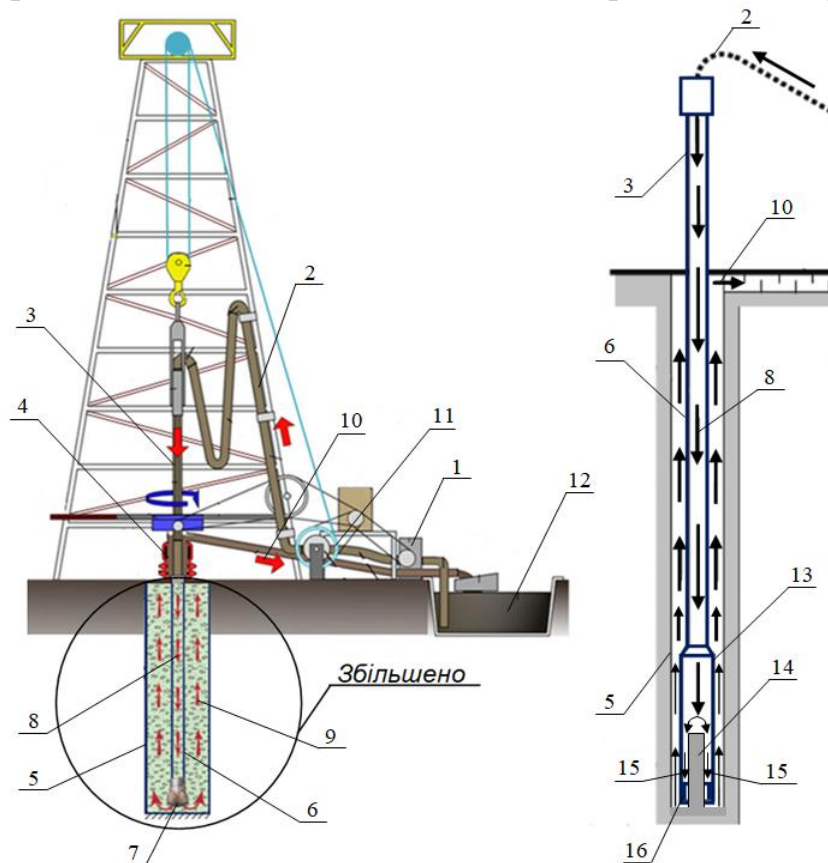


Рис. 1.1. Загальна схема технічної організації циклу буріння свердловин та прямої схеми циркуляції ПР: 1 – буровий насос; 2 – нагнітальний шланг; 3 – ведуча труба; 4 – противикидне обладнання; 5 – стінка стовбуру свердловини; 6 – бурильна колона; 7 – бурове долото на вибої свердловини; 8 – напрямок руху промивальної рідини до вибою свердловини; 9 – напрямок руху рідини в затрубному просторі; 10 – напрямок руху промивальної рідини до системи очищення; 11 – бурова лебідка із приводом; 12 – відстійник; 13 – колонкова труба; 14 – kern гірської породи; 15 – напрямок руху промивальної рідини в зазорі між керном і колонковою трубою; 16 – бурова коронки на вибої свердловини

Витрата очисного агенту (в більш вузькому сенсі цього суто технічного терміну – промивальної рідини) – такий же важливий параметр режиму буріння (ПРБ), як осьове навантаження і частота обертання бурового снаряда (БС) [2].

Спорудження свердловини супроводжується утворенням шламу (зруйнована породоруйнівним інструментом гірська порода). Через вказане, ефективність буріння в складних гірничо-геологічних умовах багато в чому залежить від якості циклу очищення вибою свердловини і самого очисного агента (ОА) від шламу. Цим питанням присвячено велику кількість робіт, у яких основна увага приділяється встановленню необхідної швидкості висхідного потоку, що забезпечує винесення частинок вибуреної породи [3].

При прямій схемі циркуляції ОА нагнітається буровим насосом (компресором) в колону бурильних труб (БТ) (рис. 1.1), за розвідувального буріння проходить кільцевим простором між колонковою трубою і керном, захоплює при цьому шлам, охолоджує породоруйнівний інструмент (ПРІ) і кільцевим простором між БТ і стінками свердловини виходить на поверхню [4].

Пряма схема циркуляції ОА відрізняється простотою виконання і забезпечує сталість процесу буріння в умовах поглинання ПР, але необхідність створення високої швидкості висхідного потоку в затрубному просторі (за використання рідинних середовищ) призводить у м'яких породах до розмиву стінок стовбура свердловини. Крім того, динамічний вплив ПР знижує вихід керна в м'яких і середніх за міцністю породах, а в разі раптового припинення циркуляції – виникає потенційна можливість прихвату БС в свердловині [5].

Практикою буріння встановлено: якщо вміст шламу в ПР перевищує 5% за об'ємом, це загрожує аварією. Наявність значного об'єму шламу на вибої призводить до зниження швидкості буріння. Це може викликати помилкову думку, що розкриті твердіші або більш абразивні породи. Насправді в таких випадках часто має місце багатократне подрібнення шламу, після чого він виноситься потоком ПР. Усе це вимагає додаткових витрат і засобів, не дивлячись на те, що гідравлічна програма буріння повністю виконується [6].

При розбурюванні м'яких порід (глин, крейди та ін.) може відбутися укрупнення дрібних частинок вибуреної породи шляхом їхнього злипання, у результаті чого різко знижується здатність ПР виносити шлам 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 (місцеві розширення) інтервалах, у яких зниження швидкості висхідного потоку сприяє накопиченню в останніх шламу [7].

За наявності у свердловині однієї або декількох каверн, як правило, процес буріння супроводжується тривалими проробками вже пройденій бурінням ділянки стовбура свердловини і виносом великої кількості зруйнованої в стінках свердловини гірської породи (ГП), а також, паралельно вказаному, відбувається накопиченню 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 [8].

Для боротьби з ускладненнями зазвичай збільшують густину ПР. Однак раціональна величина збільшення останнього показника 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 стовбуру свердловини [9].

Витрата ПР визначає швидкість руху її потоку в різних перерізах бурової свердловини. Для кожного конкретного випадку буріння існує певне раціональне значення витрати ОА, при якому, з найменшими витратами, можуть бути отримані найкращі результати буріння [10].

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) забезпечення 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.

Необхідно зазначити, що надмірна витрата ПР може негативно впливати на процес буріння, сприяти активному розмиву нестійких стінок стовбура свердловини, спричиняти, за розвідувального буріння, руйнування керна в колонковій трубі, створюючи передумови його самозаклинюванню, викликати появу сили гідралічного підпору та чинити інші шкідливі впливи. Крім того, завищена величина подачі ПР також викликає невиправдані витрати енергії і підвищений знос обладнання та іншого технологічного інструменту [11].

Вибір раціональної витрати має здійснюватися з урахуванням усіх обставин; він є важливим завданням, що 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 [12].

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).

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	$u = \frac{k}{1 + \frac{d}{D_{ек}}} \sqrt{\frac{h}{d} \sqrt{d \left(\frac{\rho}{\rho_p} - 1 \right)}}$	$D_{ек}$ – 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, Мейез	$u = \sqrt{\frac{2gd(\rho - \rho_p)}{1,12\rho_p}}$		
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 [13].

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 [14]. 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 [15].

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 [14], 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 [16], 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 [14]: 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 [17], 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 [18].

Також слід зазначити деякі особливості промивання похилих свердловин [19]. 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 оптимізації витрати ПР можна застосувати потужність БН, що визначається перепадом тиску, продуктивністю БН і механічним ККД [20]

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

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

$$Q_1 = q_0 F_{виб}, \quad (1.3)$$

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); $F_{виб}$ – площа вибою свердловини, м².

б) з умови транспортування шламу в кільцевому просторі

$$Q_2 = V_{min} F_{кн}, \quad (1.4)$$

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

Гідравлічні втрати тиску в елементах циркуляційної системи визначають за наступною методикою [21]

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

де P – сумарні гідравлічні втрати тиску в циркуляційній системі, Па; P_m – втрати тиску в БТ, Па; $P_{кн}$ – втрати тиску в кільцевому просторі за БТ, Па; P_z – втрати тиску в замках і муфтах, Па; $P_{ОБТ}$ – втрати тиску в обважених бурильних трубах (ОБТ), Па; $P_{кнОБТ}$ – втрати тиску в кільцевому просторі за ОБТ, Па; $P_{обв}$ – втрати тиску в наземній обв'язці (стояку, буровому шланзі, ведучій трубі, вертлюзі), Па; P_d – 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 [14], 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 [22].

1.2 Основні вимоги до якості очищення стовбура та вибою свердловини та фактори, що визначають їх чистоту

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 [23]. 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.

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 [24].

Вибурена порода накопичується на вибої так само і за випадку подачі недостатньої кількості ПР, що не забезпечує винесення та транспортування зруйнованої ГП з вибою споруджуваної свердловини.

Технологічна невідповідність кількості поданої ПР на вибій призведе 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 [16].

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.

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 [25].

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 [26].

Режим промивання вибою свердловини істотно позначається на реалізації гідравлічної потужності струменя бурового розчину при руйнуванні ГП буровими долотами з гідромоніторним ефектом [27].

Підвищення реологічних характеристик ПР значно погіршує очищення вибою від вибуреної породи, збільшує гідродинамічні опори та втрати тиску у циркуляційній системі споруджуваної свердловини [28].

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 [14].

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 [29].

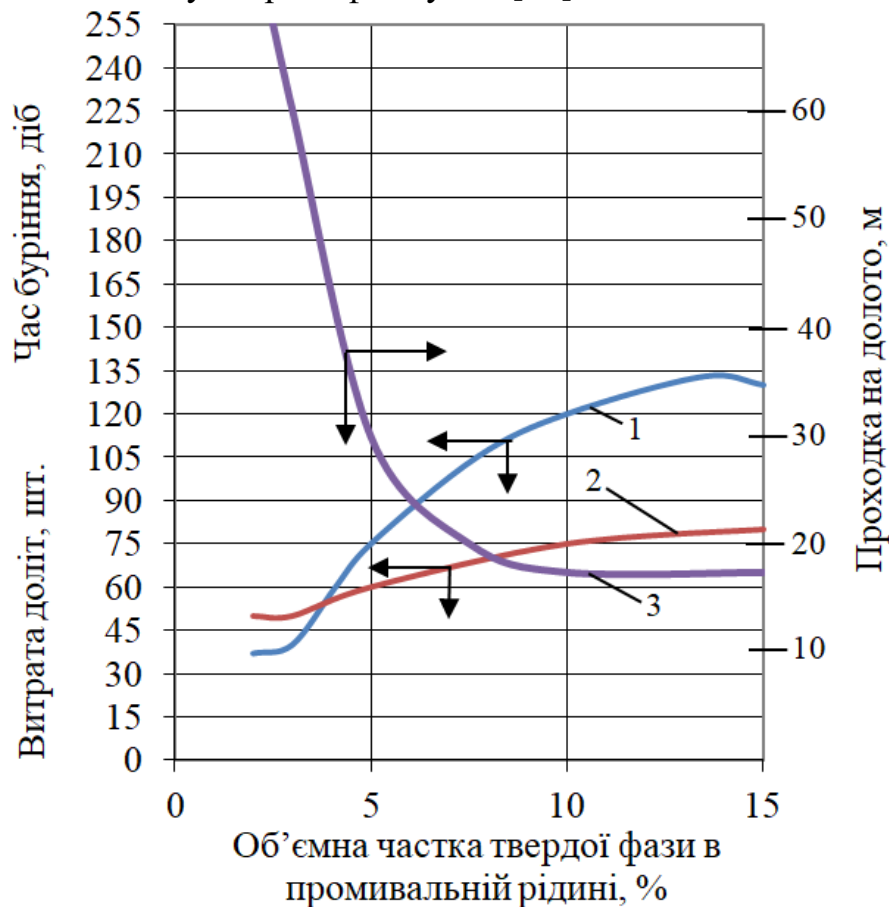


Рис. 1.2. Вплив твердої фази в ПР на показники процесу буріння: 1 – витрата доліт; 2 – час буріння; 3 – проходка на долото

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 [30].

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 [11]

$$\rho_p = T_1(\rho_{TB} - \rho) + \rho, \quad (1.6)$$

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:

$$\rho_{TB} = T_1(\rho_{Ш} - \rho_2) + \rho_2, \quad (1.7)$$

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

$$T_1 = \frac{V_{Ш}}{V_{TB}}, \quad (1.8)$$

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

Легко бачити, що $\rho_{Ш} \approx \rho_2$, $\rho_{TB} = \rho_2 = const$, при цьому залежність (1.6) носить умовно лінійний характер (рис. 1.3).

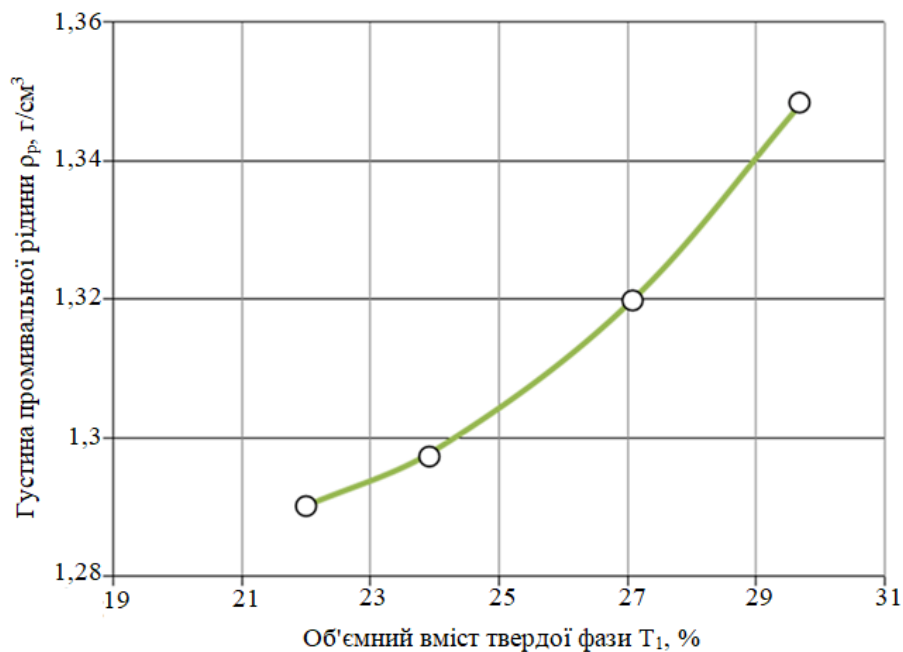


Рис. 1.3. Залежність густини ПР від вмісту твердої фази

В'язкість – найважливіший параметр ПР; вона визначатиме ступінь проникнення ПР в пори та тріщини порід, а також величину гідравлічних опорів у циркуляційній системі свердловини [31]. 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 бурово-

му 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. 1.4).

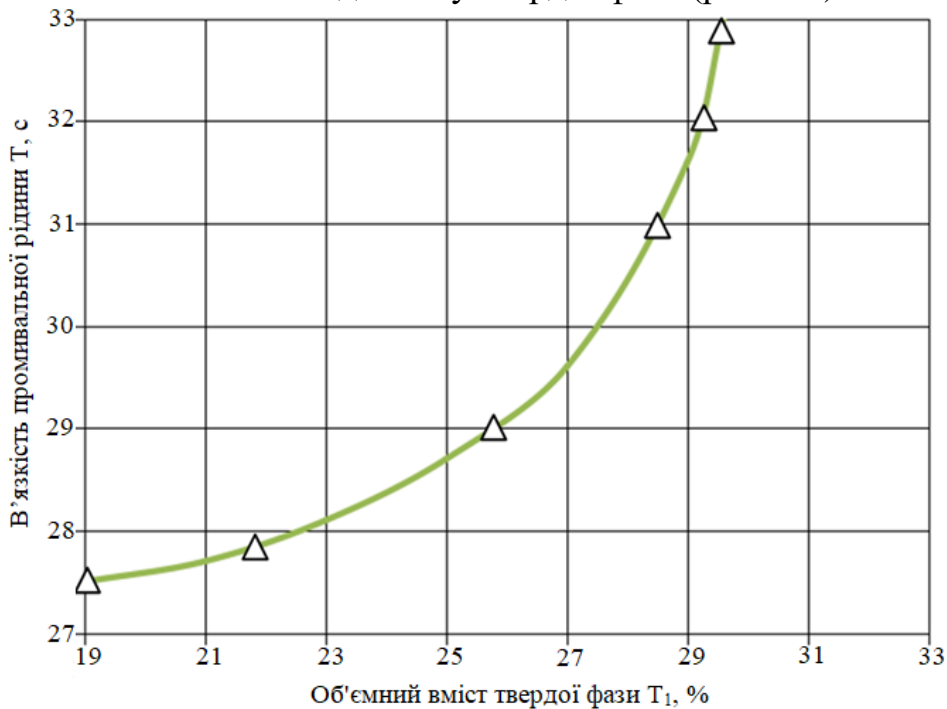


Рис. 1.4. Залежність умовної в'язкості ПР від вмісту твердої фази

Як впливає з наведеного графіку, зображеного на рис. 1.4, 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 [32]. 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) [33], які вибірково адсорбуються на поверхні частинок, як мінерального, так і органічного походження, наприклад поліакриламід (ПАА), а швидкість осідання може бути виміряна за допомогою спеціальних седиментаційних ваг (табл. 1.2).

Таблиця 1.2

Залежність швидкості седиментації від вмісту поліакриламід (ПАА) у ПР

Найменування ГП	Розмір частинок, мкм	Час седимен- тації, с	Число поділок відлікового ме- ханізму седиментаційних ваг			
			Концентрація поліакриламід			
			0	0,005%	0,01%	0,5%
Кварцовий пісок	63	30	2,2	2,4	2,5	2,6
		60	3,5	3,6	3,8	4
		90	4,3	4,4	4,6	4,8
	80	30	4,5	4,5	4,6	4,7
		60	5	5,5	5,6	5,8
		90	5,3	5,5	5,5	9
Вапняк	63	30	2,6	2,6	2,8	3
		60	3,8	3,8	4	4,2
		90	4,6	5	5	5,2
	80	30	4,8	4,9	5,4	5,6
		60	5,8	5,8	6	6,1
		90	6,5	6,9	6,9	7

З даних табл. 1.2 видно, що із збільшенням дозування ПАА зростає і швидкість седиментації, а це призводить, у свою чергу, до зростання об'єму та рихлості осаду. 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 [34]. Тому для правильного розуміння питань промивання вибою свердловини необхідно комплексно знати основні закономірності зазначених процесів та вплив різних факторів на них.

На ступінь досконалості очищення вибою свердловини від часток зруйнованої породи впливає ряд факторів [14]:

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 [17].

При русі ПР вибоєм свердловини, частинка шлама, яка розташована на його поверхні, випробовує вимивну дію потоку ПР, що рухається паралельно вибою. При цьому можливі різні варіанти відриву частинки від вибою (рис. 1.5).



Рис. 1.5. 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 [36], розрахованого за формулою

$$Re = \frac{U d_e \rho_p}{\mu}, \quad (1.9)$$

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 [14]. 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

$$h_n = a \frac{\nu}{U_{сер}} \quad (1.10)$$

та

$$U_y = by \frac{U_{сер}^2}{\nu}, \quad (1.11)$$

де h_n – товщина ламінарного підшару, м; ν – кінематична в'язкість ПР, м²/с; $U_{сер}$ – середня швидкість руху ПР в зоні вибою, м/с; U_y – швидкість руху ПР в ламінарному підшарі на відстані y від вибою, м/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. 1.6). В результаті вказаного явища частина шлама залишається не винесеною потоком ПР, що призводить до подальшого його подрібнювання та підвищеного зносу ПРІ.

Неважко бачити, що згідно з математичними виразами (1.10) та (1.11), при підвищенні швидкості руху ПР в привибійній зоні свердловини в два рази, то-

вщина ламінарного підшару зменшиться в два рази та в чотири рази збільшиться швидкість руху ПР у ньому самому [17].

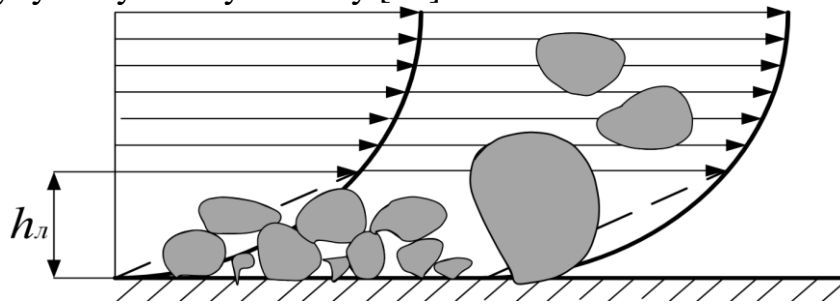


Рис. 1.6. Орієнтовний профіль швидкостей ПР в привибійній зоні споруджуваної свердловини

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 [37], для якого профіль швидкостей характеризується більш швидким 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 вра-

ховується, 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 [26].

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 [38], 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 [39].

Відносно 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 при-вибійну 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. 1.7).

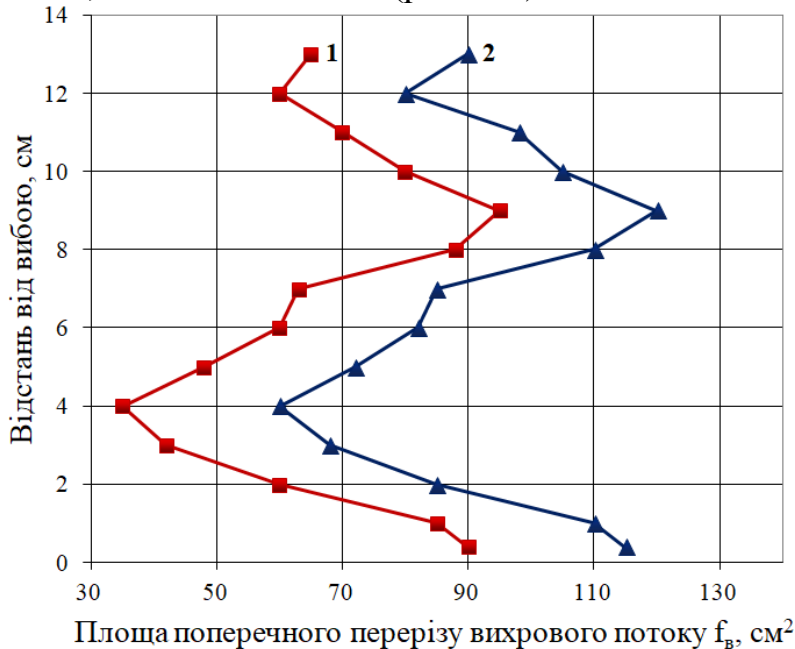


Рис. 1.7. Усереднені значення площі поперечного перерізу кільцевого простору між долотом і стінкою свердловини за висотою долота

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 частинки, 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 [40].

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 [41].

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 [31].

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 [42].

Вважається, що стовбур споруджуваної свердловини перебуває в належному стані, якщо в ньому відсутні зтяжки, 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 характеристикних техніко-економічних показників, а й до часткової або повної втрати стовбура свердловини; також вельми ускладнюється успішний спуск обсадних колон (ОК) до проєктної глибини [43]; 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, по-

винна 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 [10].

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

$$\delta = t/d_v, \quad (1.12)$$

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

Причому можна приймати в якості параметру d_v 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 про-

цесі її обтікання, заповнюються ПР, яка утворює нерухомий шар [14]. 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 поступального 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 зашлямовується. Обертання БК в таких випадках забезпечує рівномірне переміщення 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 [44]: 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 90^0 . 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.

Таблиця 1.3

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

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) [18].

Загалом, потік ПР повинен забезпечувати виконання функцій, зміст яких відображається факторами, представленими в табл. 1.3.

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.

1.3 Техніко-технологічна характеристика способу буріння свердловин із зворотною схемою циркуляції очисного агента

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) [45]. 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 керн і виносять їх на поверхню по центральному каналу.

Перший у світі комплекс технічних засобів “Core Drill” для буріння із застосуванням подвійної колони БТ і зворотної схеми циркуляції було виготовлено та випробувано (наприкінці 50-х років минулого століття) в США. Розроблена установка була призначена для буріння свердловин у пухких і щільних осадових породах на глибину до 750 м з діаметром буріння 121 мм (діаметр отриманого керна складав 50,8 мм, бурильних труб – 114 мм, внутрішній діаметр керноприймальних труб 63,5 мм). У наступні роки було розроблено ком-

плекси технічних засобів КГК - 100 та КГК - 300 для буріння свердловин зі зворотною промивкою та гідравлічним транспортуванням керна на поверхню по подвійній колоні БТ. Сферою їх застосування є буріння свердловин глибиною до 100 м (300 м) у м'яких породах II - IV категорій за твердістю (буримістю) з прошарками порід V - VII категорій при пошуково-знімальних роботах, геологічному картуванні та розвідці родовищ корисних копалин (рис. 1.8). Зруйнована бурінням ГП у вигляді шламу та кернів уловлюються лотками керноприймального пристрою, змонтованого над пересувною ємністю, що дозволяє створити замкнуту схему циркуляції ПР. Буріння свердловин виконується без кріплення їх стінок обсадними трубами (ОТ) через те, що вони не піддаються ерозійному впливу потоку ПР. Система нагнітання та відведення ПР включає нагнітальний та керновідвідний рукави, а також вентиль, за допомогою якого можна оперативнo змінювати (в разі необхідності) напрямок потоку ПР в центральному каналі БК зі зворотного на прямий [46].

Грунтовний аналіз зарубіжної практики спорудження свердловин із використанням подвійної колони БТ доводить, що вибурена порода при всіх різновидах вказаного методу виноситься стисненим повітрям або аерованим розчином при бурінні суцільним вибоєм. Зразки породи у вигляді кернового матеріалу відбираються лише з обмежених інтервалів [47].

За кордоном створено спеціалізовану апаратуру та відпрацьовано методики експрес-аналізу проб безпосередньо на буровій. За рахунок вказаного значно прискорюється та здешевлюється процес буріння шляхом збільшення об'ємів відповідних робіт та використання найбільш ефективних комбінацій методів буріння свердловин малого діаметра суцільним вибоєм, з можливістю виконання експрес-аналізу, як у процесі буріння, і після його завершення. Результатом вказаного виду робіт буде не піднятий керн ГП, а отримання графіка зміни вмісту корисних копалин за глибиною споруджуваної свердловини.

Оскільки за розглядуваного способу буріння свердловин відсутній прямий контакт потоку ОА і ГП, стінки споруджуваної свердловини оберігаються від розмиву. Доречним тут буде наведення прикладу про результати буріння геологорозвідувальних свердловин з продуванням стисненим повітрям; його зміст наступний: за наявності компресорів продуктивністю 9 - 10 м³/хв при тиску 0,7 - 0,8 МПа можна бурити свердловини глибиною до 250 м з достатньо високими техніко-економічними показниками.

Сучасні технічні засоби забезпечують ефективне застосування розглядуваного способу буріння в м'яких та середньої твердості породах у діапазоні глибин від 50 до 600 м. Відсутність контакту транспортованої зруйнованої ГП, яка виноситься на поверхню центральним каналом БК, зі стінками свердловини, а також можливість створювати значні швидкості виносу продуктів руйнування (3 - 5 м/с з використання води та 20 м/с – повітря), у тандемі із повним очищенням вибою, забезпечують разом високу якість геологічної інформації, одержуваної в результаті проведення бурових свердловинних робіт.

Сучасні закордонні моделі технічного обладнання, призначенням яких є застосування у технологічних схемах буріння із зворотною циркуляцією ОА за

використання подвійних БК, реалізують обертальний, віброударно-обертальний та вібраційний способи буріння свердловин.

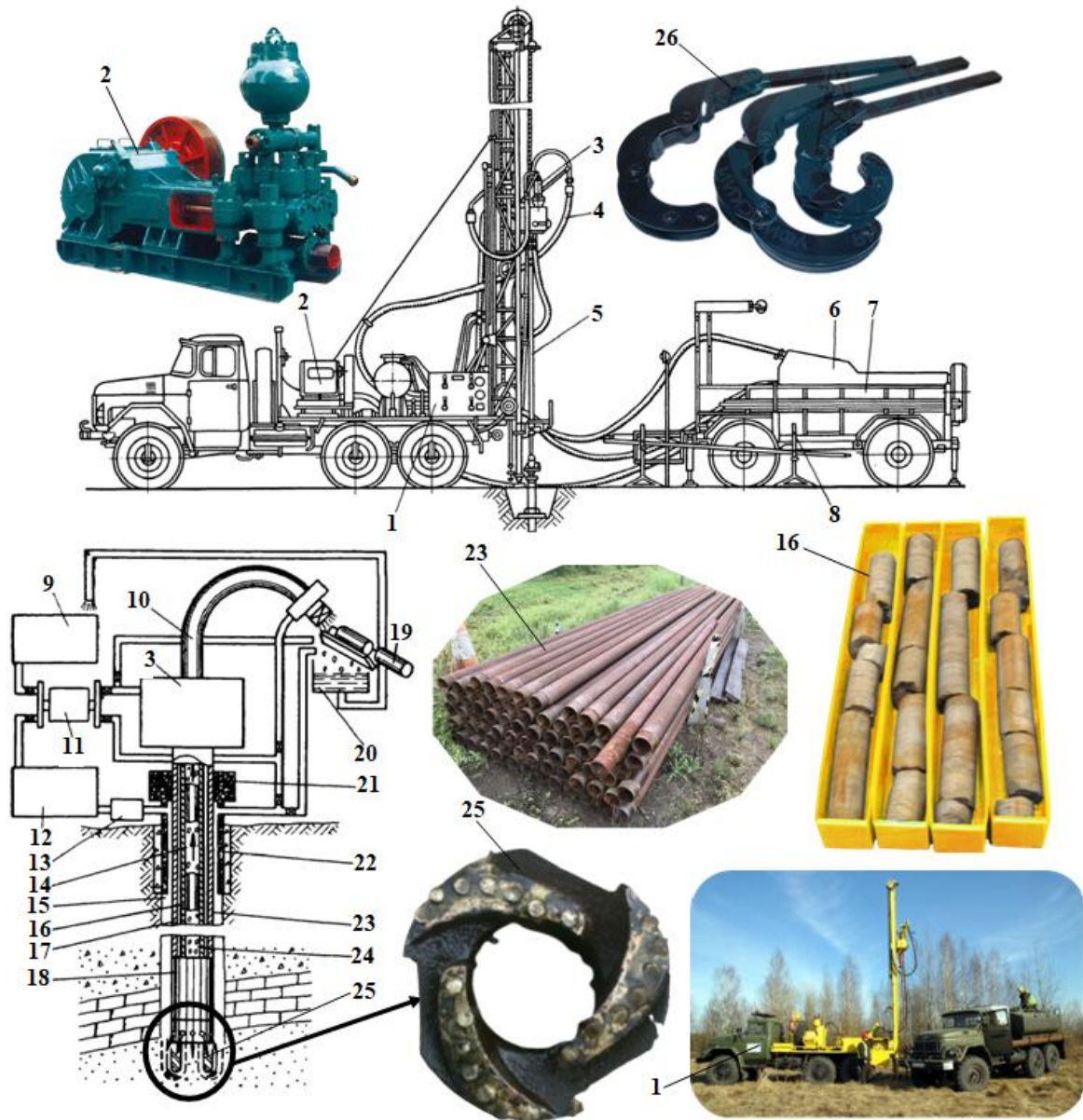


Рис. 1.8. Схема комплексу технічних засобів для буріння із гідротранспортом керна та його окремих вузлів: 1 – бурова установка; 2 – буровий насос; 3 – промивальний сальник; 4 – кернавідвідний шланг; 5 – подвійна бурильна колона; 6 – кернаприймальний пристрій; 7 – пересувна ємність; 8 – стелаж для укладання БТ; 9 – ємність для легкого розчину; 10 – відвідний шланг; 11 – головний насос; 12 – ємність з важким глинистим розчином; 13 – допоміжний насос; 14 – розчин для промивання з частинками зруйнованої породи; 15 – затрубний (кільцевий) простір; 16, 19 – керна; 17 – кільцевий простір подвійних БТ; 18 – перехідник з керналомом; 20 – вібросито; 21 – герметизуюча головка; 22 – обсадні труби; 23 – бурильні труби; 24 – кернаприймальна труба; 25 – спеціальна бурова коронка; 26 – інструментальні ключі

Областю раціонального застосування обертального буріння виступають м'які ГП алювіальних відкладень, а також ГП середньої твердості, типу вапня-

ків, сланців, пісковиків, конгломератів, карбонатних порід та зон вивітрювання кварцитів і джеспілітів. Вібродарно-обертальний метод зарекомендував себе доволі ефективним у випадку розбурювання гравійно-галечникових відкладень; вібраційний спосіб є доречним для умов спорудження свердловин в донних відкладеннях морів та океанів у зоні шельфу відповідних водоймищ [48].

Найбільш поширеним для значного числа закордонних бурових установок є обертальний метод. При бурінні з виносом зруйнованих фракцій породи через подвійну колону БТ (в м'яких і середньої твердості породах, а також твердих), в якості ПРІ застосовують лопатеві і шарошкові долота; крім того, при незначних змінах в конструкції низу БК допустиме використання занурювальних пневмударних машин. Застосування методів суцільного руйнування вибою свердловини допускає істотне збільшення швидкості поглиблення останньої, оскільки виключається доволі поширене явище самозаклинювання керна в центральному каналі спеціалізованої подвійної БК або самій коронці.

Для умов обертального буріння, в закордонній практиці, застосовують подвійні БТ зовнішнім діаметром від 48 до 114 мм зі з'єднанням труби в трубу і замковими елементами. При бурінні геологорозвідувальних свердловин з пневмотранспортом розбуреної ГП найбільшого поширення набули подвійні БТ діаметром 114 мм та дещо меншого БТ діаметром 89 і 101,5 мм. Для подвійних БТ із замковим з'єднанням діаметр центрального прохідного каналу БК більший, ніж для труб зі з'єднанням за схемою «труба в трубу».

Спосіб буріння свердловин з виносом зруйнованої ГП через центральний канал подвійної БК характеризує значне перевищення площі вибою відносно площі прохідного каналу, через який видаляється вибурена ГП. Викликано вказане конструктивними особливостями і технологічною необхідністю забезпечити зазор між стінками свердловини і БК з метою зменшення тертя останньої об породу та, як слідство, скорочення витрат потужності на обертання БК.

В цілому конструкція подвійної БК може бути оцінена за відношенням площі вибою до площі центрального прохідного каналу та площі кільцевого перерізу між зовнішньою і внутрішньою трубами до площі центрального каналу. У першому випадку зменшення цього відношення свідчить про значну пропускну здатність БК і більш ефективного очищення вибою. У другому випадку, якщо відношення менше одиниці, зростають втрати тиску в кільцевому зазорі та витрата ОА, необхідні для створення швидкості, що забезпечує винесення зруйнованої ГП. У тому разі, коли зазначене відношення перевищує значення в одиницю, має місце зменшення діаметра керна за одночасне збільшення площі руйнування. Загалом можна зазначити, що при обертальному бурінні з подвійною БК площа вибою в 3 - 5 разів перевищує площу центрального каналу.

Схема надходження ОА (стисненого повітря, аерованого розчину або ПР) на вибій споруджуваної свердловини, за використання подвійної БК, може бути реалізована у такі способи: надходження ОА з міжтрубного зазору колони БТ через центральний отвір ПРІ на вибій і винесення розбуреної породи через похилі канали в спеціальному переходнику, який з'єднує затрубний зазор у привибійній зоні з центральним каналом подвійної концентричної БК; вихід ОА з мі-

затрубного зазору подвійної колони БТ через отвір у спеціальному компонованні в привибійну зону та видалення розбуреної породи через центральний отвір у долоті і далі рух продуктів руйнування в центральний канал подвійної БК [45]. У розглянутих схемах очищення вибою від вибуреної ГП передбачена ізоляція затрубного зазору дещо вище отворів, через які або ОА потрапляє в привибійну зону, або зруйнована ГП спрямовується в центральний канал подвійної БК.

Слід також зазначити, що в зарубіжній практиці знайшла застосування схема зворотно-нагнітального промивання з безперервним підйомом керна одинарною БК, в розрізах, не ускладнених поглинаннями. При перетині потужних інтервалів проникних порід, із обов'язковим виникненням явищ поглинання ПР, ускладнені зони ліквідуються установкою ОТ або тампонажем спеціальними сумішами, що швидко схоплюються.

Серед основних переваг розглядуваного способу можна виділити наступні основні: зниження витрати ПР; зниження числа СПО; зменшення викривлення свердловини; високі механічні швидкості буріння (це обумовлено рядом факторів: інтенсивним очищенням вибою від вибуреної ГП, що попереджає повторне переподрібнення шламу та руйнування керну); висока достовірність геохімічного опробування, що пов'язана з оперативним виносом на поверхню всього об'єму вибуреної ГП; можливість ефективного буріння в ускладнених геологічних умовах [49]. Притаманний означеному способу також і ряд недоліків, серед яких найбільш значущими є: складність конструкцій подвійної БК та конструкції вертлюга, можливість заклинювання керна в центральному каналі.

На відміну від звичайних прийомів, технологія буріння з гідротранспортом керна дозволяє безперешкодно проходити свердловини в зонах поглинання ПР, водонапірних пісках і набухаючих різновидах глинистих ГП. Несприятливими умовами для здійснення буріння свердловин вказаним способом є наявність у товщі м'яких відкладень окремих прошарків порід VIII - IX категорій, навіть невеликої потужності, з частим перемежуванням абразивних твердих та м'яких порід, галькового матеріалу, а також необхідність заглиблення у породи кристалічного фундаменту на глибини понад 3 м.

Специфіка процесу буріння із гідротранспортом керну полягає у високих швидкостях його протікання, утворенні великого об'єму зруйнованої ГП в одиницю часу, деякій невизначеності розподілу векторів руху потоку ПР в привибійній зоні. Правильність ведення технологічного процесу буріння набуває особливо великого значення, оскільки визначає не тільки техніко-економічні показники, а й загалом отримання позитивного результату. При відпрацюванні технології та режимів буріння повинно забезпечуватися ефективне руйнування породи, своєчасне відділення та видалення керна, винесення шламу з-під торця коронки, стабілізація стінок свердловини, запобігання утворенню сальників на колоні та підклинок керна у її внутрішньому каналі [45].

Значна різноманітність геологічних умов і властивостей ГП, видів свердловинних робіт, для яких застосовується даний метод, вимагають розробки широкого кола технологічних питань, починаючи з вибору ПРІ, визначення раціо-

нальних режимів буріння, способів стабілізації свердловини при бурінні із застосуванням різних ПР і схем циркуляції, методів відбору проб тощо.

При бурінні з гідротранспортом керна твердосплавними коронками важливе значення має не тільки категорія твердості ГП, тут обов'язково необхідно звертати увагу на величину потужності твердих прошарків гірських порід, які вирішальним чином впливають на ресурс застосовуваного ПРІ. Збільшення потужності прошарків і підвищення їхньої твердості унеможлиблює застосування твердосплавних коронок. У таких випадках практикується перебудування окремих інтервалів із прямим промиванням та застосуванням шарошkových доліт або звичайних колонкових снарядів з алмазними коронками. Колонкові снаряди застосовуються також під час відбору керна корінних ГП.

Серед деякого числа особливостей реалізації технології буріння з гідротранспортом керна, важливе значення має те, що слід розрізняти ПРБ встановлювальні оператором, та показники процесу буріння, які залежать від геолого-технічних умов, фізико-механічних властивостей ГП, стану свердловини, обводненості тощо. До перших відносяться осьове навантаження, частота обертання та інтенсивність промивання, до других – механічна швидкість, крутний момент, зусилля підйому інструменту і тиск ПР.

При спорудженні свердловин в складних геолого-технічних умовах виникає стійка необхідність у проведенні спеціальних технологічних заходів, спрямованих на зменшення інтенсивності поглинання ПР, стабілізацію стінок свердловини, забезпечення відповідності ресурсу ПРІ глибині свердловини. Непрямою, але показовою ознакою правильності вибору ПРБ конкретної свердловини є інтенсивність та завантаження висхідного потоку ПР, а також рівень рідини в затрубному просторі і стан кернового матеріалу.

Важливим фактором підвищення ефективності буріння з гідротранспортом керна є вибір відповідної ПР [50]. У більшості випадків використовується технічна вода, яка дозволяє бурити без ускладнень і з достатніми швидкостями в таких умовах, в яких при звичайному колонковому способі застосовується глинистий розчин. При цьому витрата ПР знижується у декілька разів. Однак у міру ускладнення геолого-технічних умов – поява у геологічному розрізі свердловини нестійких ГП та збільшення глибин – виникає стійка необхідність застосування спеціальних ПР та схем їх циркуляції.

ПР для буріння з гідротранспортом керна в ускладнених геолого-технічних умовах повинні володіти високою носійною здатністю при порівняно невеликій в'язкості, низькими фільтраційними властивостями і задовільними кольматційними характеристиками (табл. 1.4). Ефективність буріння залежить також від властивостей та рівня ПР в затрубному просторі та способу його підтримки.

Керновий матеріал залежно від фізико-механічних властивостей ГП зазвичай представлений декількома різновидами, а саме: «стовпчиками» (утворюються при бурінні глин, крейдових відкладень та інших щільних ГП; довжина стовпчика, що забезпечується конструкцією кернолому, в загальному випадку, становить 15 - 20 см, а його діаметр 28 - 38 мм; проте при перебудуванні пластичних ГП його довжина значно збільшується і на поверхню керн надходить практично

одним суцільним конгломератом); «пульпою» (характерним це є для ґрунтового шару, суглинків, пісків, кори вивітрілих кристалічних порід, крейди, окремих різновидів глин, бурового вугілля; пульпа представлена різними за величиною фрагментами породи); «пелюстками» (вони утворюються при ходінні БС під час опрацювання стовбура свердловини, а також при бурінні слабопластичних порід; є витягнутими смужками довжиною 30 - 70 мм і товщиною 5 - 10 мм).

Таблиця 1.4

Типи ПР для різних геолого-технічних умов буріння

Глибина свердловини, м	Характеристика порід у геологічному розрізі	Рецептура застосовуваної ПР	
		У бурильній колоні	У затрубному просторі
До 150	Глинисті породи, окислені кори вивітрювання, нестійкі слабозв'язані породи	Вода або вода і до 2% реагентів поліакрилатів (ПАА, МЕТАС, ГПАН, К - 4, 9)	Свердловинна вода (природний глинистий розчин)
До 150	Глинисті породи, кори вивітрювання із вмістом щибенистого матеріалу, прошарки нестійких порід	Вода або вода і до 2 - 3% реагентів поліакрилатів	Глинистий бентонітовий розчин в'язкістю до 30 с
До 200 - 300	Глинисті породи, суглинки тріщинуваті, кори вивітрювання, прошарки піску		Глинистий розчин в'язкістю до 35 с із вмістом до 2,5% реагентів поліакрилатів
До 300	Глинисті породи, кори вивітрювання із вмістом щибеню, прошарками алевролітів, пісковиків, хлорит-сероцитових та вуглевмісних сланців. Тріщинуваті та нестійкі гірські породи	Глинистий розчин із добавками 3 - 4% реагентів поліакрилатів, в'язкістю 30 - 35 с, густиною до 1,1 г/см ³	Те ж саме, що й в колоні (закачування з вибою та підлив через гирло свердловини)

Керношлямовий матеріал, отриманий за розглядуваної технології, дозволяє: вивчати пухкі породи мезозойського та кайнозойського віку з метою побудови стратиграфічних схем їх залягання; вивчати пухкі слаболітофіковані відкладення та геологічні тіла складного просторового розміщення зі строкатим лі-

тофаціальним складом; чітко визначати контакти суглинків та глин із продуктивними вугільними пластами; виявляти елементи – індикатори міді, свинцю, цинку при геохімічних пошуках глибинних вторинних ореолів розсіювання поліметалічного оруднення; літологічно розчленовувати розрізи та вивчати елементи тектонічної будови; оцінювати загальну вугленосність, встановлювати межі зони окислення пластів, визначати зольність вугілля; оцінювати запаси, вивчати фундамент і пухкі відкладення, опробувати нерудні корисні копалини (у комплексі з колонковим способом буріння).

При бурінні з гідротранспортом керна необхідно забезпечити точну прив'язку відібраних геологічних проб до глибини свердловини і максимально зберегти структуру і об'ємний вихід керна. Ці вимоги забезпечуються спеціальними прийомами технології буріння. З метою запобігання перемішування матеріалів у лотку при відборі проби корисних копалин слід заздалегідь знизити подачу ПР до 100 -120 л/хв [45]. Для отримання керна з мінімально порушеною структурою із пластичних ГП коронку задавлюють у вибій на 0,1 - 0,3 м без обертання БК з промиванням вибою свердловини. Відрив стовпчика керна здійснюється включенням обертання. Керн при застосуванні методу буріння з гідротранспортом зразків породи не забруднений глинистим розчином, що підвищує його якість та достовірність аналізів. Після заповнення керном одного або кількох лотків у керноприймальному пристрої проводиться укладання матеріалу в ящики, які встановлюються на борту ємності.

Геологічний матеріал незв'язних ГП типу пісків відбирається з коробчатих шламозбірників з піддону пристрою. При розміщенні етикеток у кернових ящиках необхідно враховувати, що у пластичних породах лінійний вихід керна може досягати 150 - 200% і більше.

Зіставлення геологічних даних, отриманих за результатами буріння звичайним колонковим способом, та таких, які є в наявності при застосуванні методів гідротранспорту керна, показує, що в останньому випадку можлива більш точна побудова розрізу завдяки виявленню прошарків, які руйнуються при звичайному, у тому числі безнасосному способі буріння. Це підтверджується і геофізичними методами досліджень, які дозволяють виявляти глибини та потужність прошарків різних ГП з точністю не менше $\pm 0,2$ м, причому вказаний інтервал знаходиться в межах точності інтерпретації каротажних діаграм.

З метою одержання надійної геологічної інформації технологія буріння, методика відбору проб та прив'язка останніх до конкретної глибини свердловини мають бути відпрацьовані для кожного виду корисних копалин з урахуванням конкретних геолого-технічних умов.

1.4 Деякі основоположні питання розробки та обґрунтування раціональних рецептур очисних агентів

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 [51].

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 ПР здійснюється з урахуванням вимог до умов реалізації вибійних та свердловинних циркуляційних процесів із відповідними наслідками.

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 [52].

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 проводять 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.

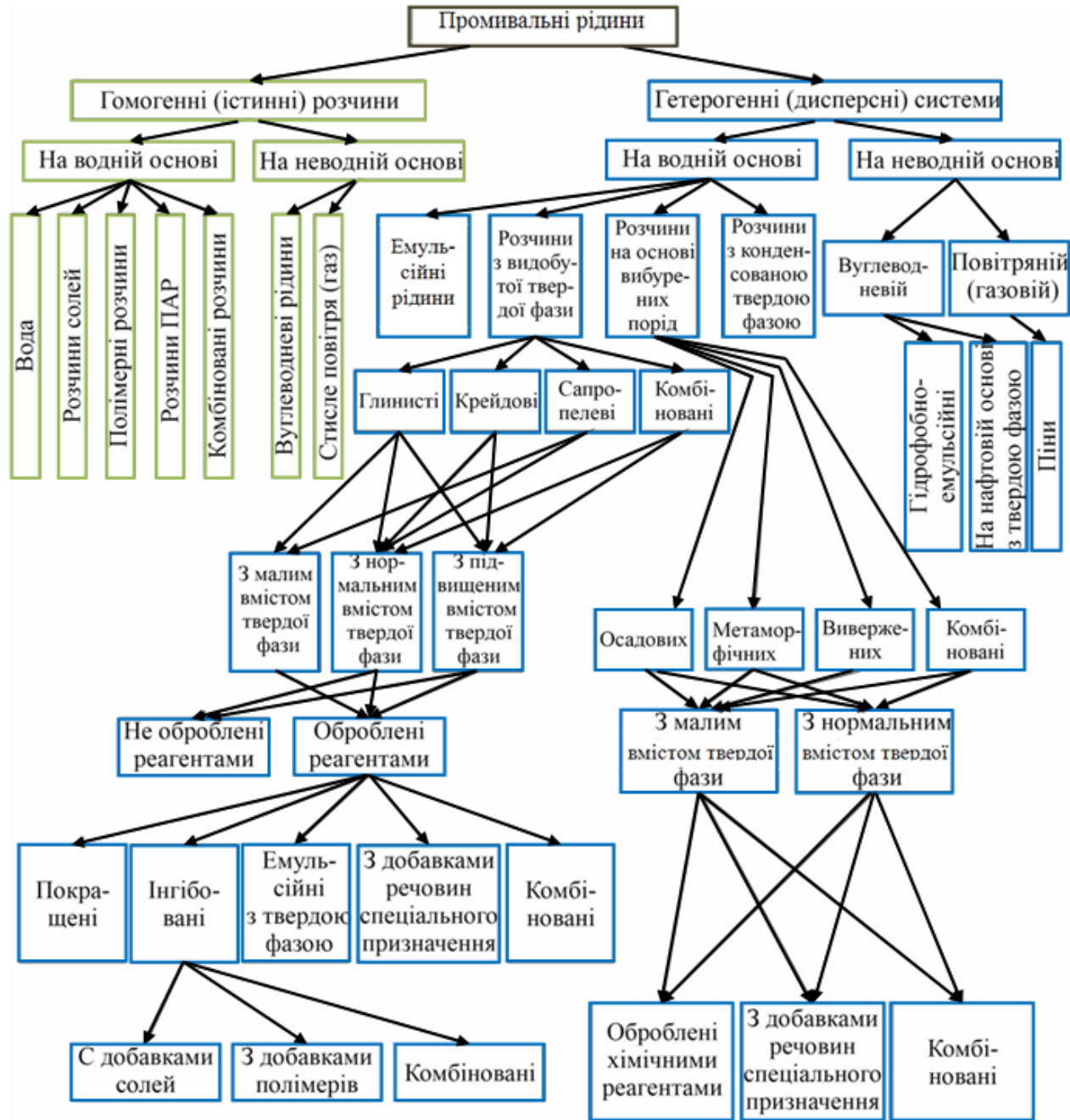


Рис. 1.9. Узагальнююча класифікація ПР за складом дисперсійного середовища і дисперсної фази

Таким чином, для ефективного виконання розглянутих інтегральних задач в різних геолого-технічних умовах буріння свердловин, ПР повинні мати певні

значення показників технологічних властивостей, які, в свою чергу, виступають функцією компонентного складу та концентраційних величин.

Для ефективного виконання цих функцій в різних геолого-технічних умовах буріння свердловин, ПР повинні володіти певними значеннями показників властивостей, які визначаються певним компонентним і дольовим складом відповідних реагентів. Існує велика кількість класифікацій ПР [6], що застосовуються при бурінні свердловин, найбільш поширеною серед яких є класифікація за складом дисперсійного середовища і дисперсної фази (рис. 1.9).

Технологія створення і застосування ПР при бурінні свердловин постійно вдосконалюється. З ростом глибин і ускладненням гірничо-геологічних умов при бурінні свердловин, висуваються нові додаткові вимоги щодо властивостей ПР, способів і режимів їх циркуляції. Подальше вдосконалення та розробка нових видів ПР з урахуванням геолого-технічних умов і технології буріння є основним завданням, що стоїть перед дослідниками і практиками [10].

Спостерігається стійка тенденція усе більш широкого застосування газорідних сумішей (ГРС) в практиці спорудження свердловин, як розвідувальних, так і експлуатаційних [53]. ГРС включають рідку і, як правило, тверду фази, а також обов'язковою для них є наявність повітря (газу) і ПАР, які, адсорбуючись на поверхні бульбашки повітря (газу), оберігають їх від коалесценції і диспергування. Ці суміші – багатофазні системи по мірі аерації (співвідношення витрат рідини і газу), що підрозділяються на аеровані рідини (багатофазні дисперсні системи, в яких рідина є дисперсійним середовищем, а газ – дисперсною фазою; у них бульбашки газу не пов'язані між собою, і, як правило, мають кулясту форму), піни (багатофазні дисперсні системи, в яких дисперсною фазою служить рідина, а дисперсійним середовищем – газ) і тумани (дисперсні системи, в яких крапельки рідини є дисперсною фазою, а газ – дисперсійним середовищем) [10]. На практиці застосовують різні іоногенні і неіоногенні ПАР. Додаткова стійкість ГРС досягається за допомогою введення до їх складу карбоксилметилцелюлози, крохмалю, гідролізованого поліакриламід, ГПАН і навіть бентоніта. При цьому слід зазначити доволі значне зниження витрати компонентів суміші, в порівнянні з приготуванням звичайних ПР.

ГРС отримують з водних розчинів ПАВ, шляхом спільного диспергування піноутворюючого розчину і повітря (газу). Ефект диспергування досягається: при проходженні струменів газу через піноутворюючий розчин; дією рухомих пристроїв на рідину в атмосфері повітря або ж дією рухомої рідини об яку-небудь перешкоду; ежектуванням повітря рухомих струменем розчину [6].

Спосіб буріння із застосуванням ГРС не вимагає розробки і застосування нового устаткування і, як правило, ПРІ, але організація робіт і технологія збільшують витрати. В той же час, істотне зростання продуктивності і значний економічний ефект при використанні ГРС компенсує додаткові витрати.

Нині ГРС застосовують при бурінні свердловин на тверді корисні копалини, а також рідкі (вода, нафта) і газоподібні. Їх використовують також при обертовому (ротаторному і турбінному), ударно-обертальному, безкернавому і кернавому бурінні (із застосуванням алмазних і твердосплавних коронок).

Істотні переваги технологічного характеру, супроводжуючі процес буріння із застосуванням ГРС пояснюються особливостями компонентів, що входять до їх складу – рідини і газу. Так, наявність в них газової фази дозволяє в широкому інтервалі регулювати гідростатичний тиск у свердловині, що призводить до істотного зростання механічної швидкості буріння, а також дає можливість застосовувати їх в умовах поглинань різної інтенсивності. Рідка фаза, що містить змащуючі інгібуючі добавки, а також різні хімічні реагенти, які знижують корозію бурового інструменту і перешкоджають деструкції цього очисного агента, дозволяють успішно управляти технологічними властивостями ГРС.

ГРС ефективні при розкритті, освоєнні і капітальному ремонті нафтових свердловин [54]. Зміна їх густини від 900 до 50 кг/м³ і менш дозволяє проходити свердловини в зонах з аномально низьким пластовим тиском (АНПТ). Використання ГРС для розкриття пласта і освоєння свердловин збільшує їх міжремонтний період роботи в 3 - 4 рази. Продуктивність свердловин збільшується в 1,5 - 2 рази, а терміни їх освоєння скорочуються в 4 - 5 разів.

ПАР, що входять до складу ГРС, адсорбуються на поверхні знову утворюваних тріщин, перешкоджаючи тим самим їх закриттю і викликаючи ефект розклинювання, що у свою чергу призводить до зниження міцності породи. Крім того, частки вибуреної породи притягуються і прилипають до бульбашок газу, що сприяє поліпшенню очищення вибою.

Ефективне з позицій покращення вибійних свердловинних умов явище мимовільного прилипання твердих тіл до газових бульбашок засноване на взаємодії вільної поверхневої енергії між твердою і рідкою фазами.

Внаслідок наявності некомпенсованої вільної енергії молекули поверхневих шарів твердого тіла і рідини активно взаємодіють між собою, а також з молекулами і іонами розчинених речовин, шляхом змочування, обміну і гідратації іонів, сорбції, хемосорбції, гетерогенних реакцій тощо. В результаті вказаних взаємодій виникає тяжіння твердого тіла і рідини.

Винесення шламу здійснюється з швидкістю, близькою до такої потоку ГРС, оскільки швидкості прослизання фаз за високої міри аерації незначні.

Виходячи зі сказаного, можна зробити висновок про те, що на сьогодні технологія буріння із застосуванням ГРС є однією з прогресивних в області бурових робіт при розвідці і експлуатації родовищ. ГРС забезпечують високу ефективність і продуктивність буріння, особливо в складних гірничотехнічних умовах. Проте існує ряд невирішених завдань, що гальмують ширше використання ГРС в практиці буріння і експлуатації покладів корисних копалин.

Підтримка стінок від обвалення є одним з основних завдань, які доводиться вирішувати при спорудженні свердловин. Нестійкість стовбура може проявлятися по різному: м'які пластичні ГП видавлюються в стовбур свердловини, обвалюються і обсипаються; тверді крихкі породи схильні до обвалення під дією статичних і гідродинамічних навантажень. Усе це призводить до збільшення поперечного розміру стовбура, утворення пробок і заповнення окремих інтервалів породою під час СПО. Ці ускладнення сильно впливають на тривалість і вартість спорудження свердловин.

Різні форми нестійкості стовбура та форми взаємодії, що виникають в результаті контакту між ПР і глинистими породами, обов'язково пов'язані з явищами гідратації. Можливі наступні механізми адсорбції води на глинистих частках: поверхнева гідратація і осмотичне набрякання [46].

При контакті з водою або водними розчинами глини, на відміну від інших ГП, мимоволі переходять з твердого стану в пастоподібний. В результаті некомпенсованих молекулярних сил на поверхні глинистих мінералів утворюються сольватні (гідратні) шари і відбувається приріст об'єму часток. Цей процес (набрякання) супроводжується розвитком тиску набрякання або розклинюючим тиском і виділенням тепла набрякання. Основну роль в міжпакетному набряканні і в утворенні сольватних (гідратних) шарів на зовнішніх поверхнях глинистих мінералів грають адсорбційні сили.

Правильний підбір типу і рецептури ПР може забезпечити задовільну стійкість стовбура свердловини. Зниження гідратації і набрякання глинистих порід досягається введенням до складу ПР органічних сполук, ПАР і електролітів, потенціали іонізації яких дорівнюють потенціалам іонізації глинистих ГП. Застосування водорозчинних полімерів, більшість з яких поєднують в собі властивості аніонних ПАР і поліелектролітів, також сприяє зниженню міри набрякання [43].

Для надання ПР необхідних властивостей, які з одного боку, забезпечать підвищення ефективності руйнування ГП на вибої, а з іншої створять сприятливі умови для стабільного винесення шламу на поверхню і підтримку стінок свердловини в стійкому стані, її піддають обробці різними методами. Найбільш відомими є такі види обробки ПР: хімічна, магнітна, термічна і електрохімічна, в її різних варіаціях та конструктивних втіленнях.

Електрохімічна обробка як технологія – це отримання і наступне використання активованої за допомогою електрохімічних полів води, або в процесах її очищення від небажаних компонентів, або в різних технологічних процесах як реагенту або реакційного середовища. Вказана операція здійснюється з метою управління складними фізико-хімічними реакціями, економії енергії, часу і матеріалів, підвищення якості кінцевого продукту, зменшення утворення відходів. Досить великий інтерес такий вид дії на середовище представляє для обробки ПР при спорудженні свердловин, як альтернативного виду регулювання параметрів і властивостей конкретного ОА.

Відомо, що вода є слабким електролітом і тому в малій мірі піддається мимовільній, спонтанній дисоціації. У водних розчинах має місце, як дисоціація молекул самої води, так і дисоціація домішок, розчинених в ній. На останній процес чинить помітний вплив взаємодія домішок з дипольними молекулами води. Це явище гідратації грає істотну роль при утворенні водних розчинів.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1

1. Розглянуто основні особливості техніко-технологічної організації процесів циркуляції очисного агента та їх методологічне підґрунтя.

2. Проаналізовано вплив параметрів очисного агента на хід та спрямованість вибійних процесів руйнування порід і транспортування частинок шламу.

3. Показано наявність тісного взаємозв'язку між фізико-геометричними характеристиками частинок шламу та результатами циркуляційних процесів, що реалізуються на вибої та у стовбурі споруджуваної свердловини.

4. Сформульовано, в логічній послідовності, зміст визначальних параметрів, які мають місце в забезпеченні якісного очищення свердловини від продуктів руйнування гірських порід, а також створенні ефективних умов для застосування прогресивних методів регенерації промивальних рідин.

5. Визначено орієнтовний стан розподілу силових гідравлічних характеристик потоку за руху його активних струменів на вибої свердловини.

6. Показано особливості схем застосування методів зворотної циркуляції очисного агента, пов'язані з різноманітністю геолого-технічних чинників.

7. Розглянуто принципові аспекти методу буріння із гідротранспортом кернавого і шламового матеріалу та охарактеризовано його технічний супровід.

8. Наведено короткі технологічні відомості про вимоги, що ставляться до рецептурного і компонентного складу деяких типів очисних агентів із метою їх якнайповнішої відповідності конкретним обмежувальним свердловинним факторам прогресивної циркуляційної програми.

РОЗДІЛ 2. ПРОБЛЕМАТИКА ПРОЦЕСІВ ВЗАЄМОДІЇ ПРОДУКТІВ РУЙНУВАННЯ З ПОТОКОМ ОЧИСНОГО АГЕНТУ

2.1 Дослідження гранулометричного складу продуктів руйнування (шламу) бурових свердловин

До продуктів руйнування за буріння свердловин відноситься, серед іншого, буровий шлам, який представляє собою уламки зруйнованих ПРІ гірських порід [55]. 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 [6].

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 [47].

Вагомий інтерес для теорії і практики проектування режимних параметрів процесу буріння ГП представляють питання, що стосуються гранулометричного складу продуктів руйнування [56]. 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 шламов 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 ви-

значення відсоткового вмісту окремих фракцій продуктів руйнування (бурового шламу ГП), що складаються з частинок певного розміру.

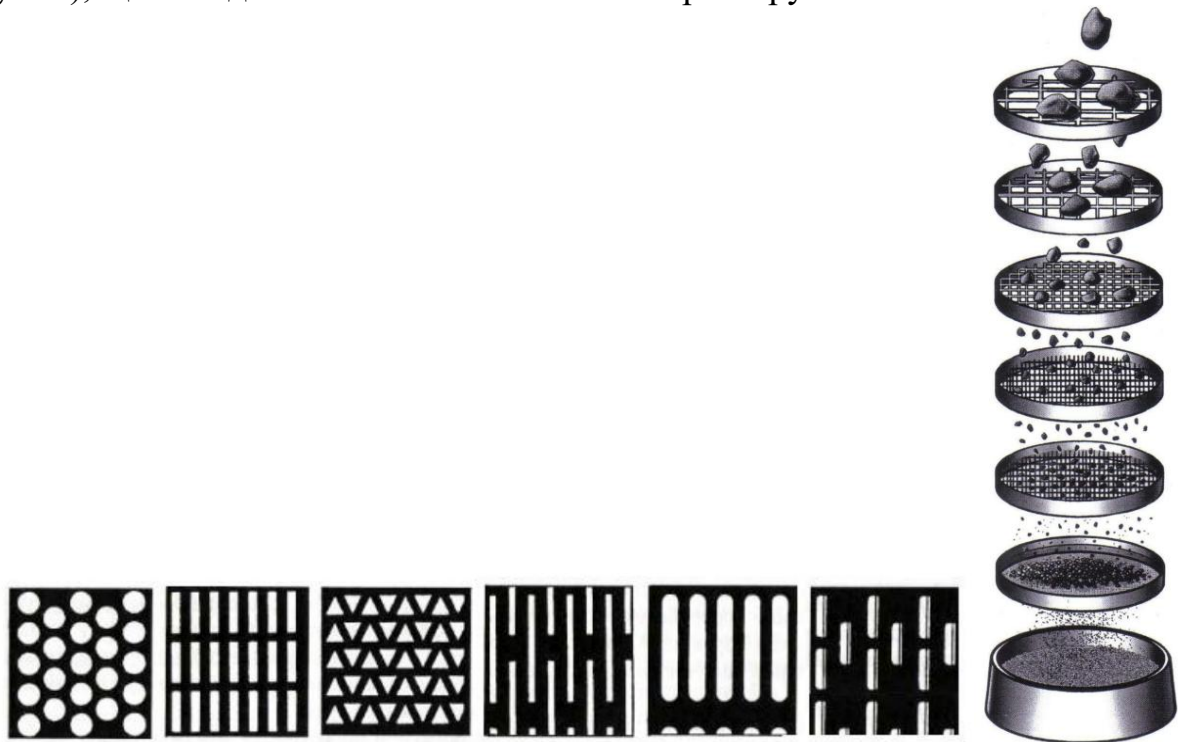


Рис. 2.1. Пояснювальна схема проведення ситового аналізу шламу ГП

Ситовий аналіз може бути здійснений просіюванням деякої навіски матеріалу через набір стандартних сит (рис. 2.1), що відрізняються розміром отворів (круглої, щілинної, трикутної, або прямокутної форм) [57]. 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.

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 спо-

руджуваної 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 [4]. В якості випробовуваних зразків ГП, за дослідного буріння, були прийняті такі характерні їх представники (рис. 2.2): роговик (являє собою тонкозернисту або приховано-кристалічну контактово-метаморфічну ГП; формується за нагріву глинистих та інших тонкозернистих алюмосилікатних порід, які знаходяться в контакт 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) [58].



Рис. 2.2. 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 (реш-

та); володів масивною, щільною однорідною текстурою і порфіробластовою структурою; за твердістю його можна було віднести до VI категорії.

Випробований на руйнування дрібноалмазним ПРІ пісковик, мав масивну будову, слоїстий, дрібнозернистий з частинками слюди і сильно зруйнованим польовим шпатом (віднесено до VII категорії за твердістю) [59].

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 [60].

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 [4]. 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 (Φ) від діаметра вибурених частинок при різних поєднаннях режимних параметрів (рис. 2.3).

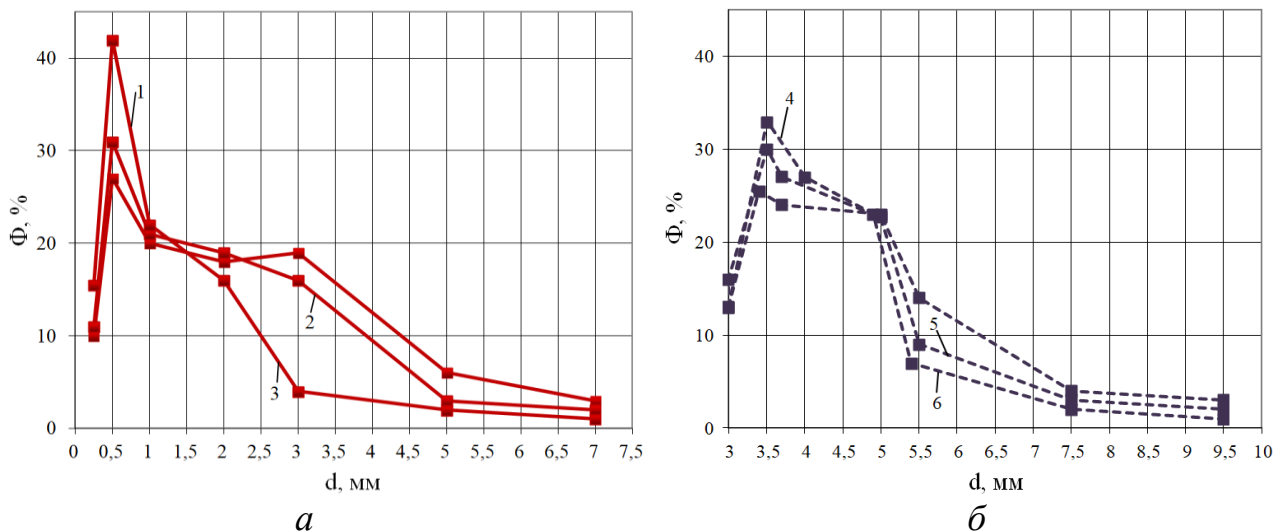


Рис. 2.3. Графік залежності фракційного складу шламу ГП від діаметра вибурених частинок: *а* – при бурінні коронкою з діаметром 85 мм (1 – при навантаженні 1200 даН; 2 – 1100 даН; 3 – 825 даН); *б* – при бурінні коронкою з діаметром 118 мм (1 – при навантаженні 1350 даН; 2 – 1175 даН; 3 – 1100 даН)

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 зме-

ншується 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.

2.2 Визначення умов та закономірностей руху частинок продуктів руйнування гірських порід (шламу) за буріння свердловин

Резюмувати з упевненістю можна наступне беззаперечне твердження: витрата ПР – виступає таким же важливим ПРБ, як осьове навантаження і частота обертання БС [31]. Керований потік ОА забезпечує стійкий в часі процес очищення вибою споруджуваної свердловини від зруйнованої ГП, винос її у вигляді шламу зі стовбура, охолодження ПРІ, за певних умов сприяє інтенсифікації руйнування ГП на вибої, використовується для приводу вибійних двигунів тощо. Для умов колонкового буріння саме кількість ПР, що подається в свердловину, відіграє домінуючу роль у формуванні керну ГП (надмірна витрата ПР в цьому контексті матиме негативний вплив, спричиняючи самозаклинення і активне руйнування керну). Обґрунтований вибір раціональної витрати ОА повинен відбуватися з урахуванням перелічених обставин; він є важливим завданням, що визначає ефективність процесу буріння та якість свердловини, як інженерної споруди з певним терміном безвідмовної експлуатації.

Серед головних завдань створення циркуляції ПР в процесі буріння свердловин є видалення з неї залишків розбурених ГП (породного шламу) і тим самим забезпечення сталості механізму взаємодії ПРІ з гірським масивом та уникнення невиправданого додаткового зносу вибійного, а також свердловинного інструменту. Зазначимо, що якість очищення свердловини, рівнозначно і ефективність виконання інших завдань, залежатиме від швидкості руху ПР в окремих ділянках циркуляційного контуру (швидкісні гідравлічні параметри потоку ПР) та, власне, самих технологічних характеристик ПР.

Схема розподілу швидкостей за перерізом каналу руху потоку ПР буде залежати від ряду об'єктивних факторів: форми перерізу каналу руху, типу ПР та її технологічних властивостей, режиму руху і т. д., а нерівномірність швидкості

поток характеризуватиметься відношенням максимальної швидкості ω_{max} в будь-якому перерізі потоку ПР до середньої об'ємної швидкості $\omega_{сер}$ в тому ж перерізі, тобто виражатиметься наступним співвідношенням

$$\alpha = \omega_{max} / \omega_{сер} . \quad (2.1)$$

Встановлено, що для потоку в'язкої рідини (підпорядковується особливостями режиму своєї течії закону в'язкого тертя Ньютона; дотичне напруження і градієнт швидкості такої рідини лінійно залежні; коефіцієнт пропорційності між вказаними величинами відомий як в'язкість; типова ньютонівська рідина – вода) в круглій трубі при ламінарному режимі $\alpha = 2$; при турбулентному режимі параметр α досягає значень, близьких до одиниці. При структурному режимі руху в'язко-пластичних рідин, залежно від середньої швидкості і реологічних параметрів ПР, розглядуване відношення змінюється майже від 1 до 1,6.

Таким чином, в залежності від положення транспортованої частинки шламу ГП в потоці, швидкість її виносу може змінюватися в досить широких межах, і це може стати причиною того, що певний відсоток частинок, які потрапили в зону менших швидкостей, не будуть виноситися, хоча значення $u \leq \omega_{сер}$.

Загалом залежність механічної швидкості проходки свердловини $V_{мех}$ від конкретного значення витрати ПР Q описується рівнянням [14]

$$V_{мех} = Q / (a + bQ) \quad (2.2)$$

де a і b – величини, що залежать від властивостей ГП геологічного розрізу споруджуваної свердловини, якості та властивостей ПР, конструкції ПРІ, розміру кільцевого простору і швидкості обертання інструменту.

Відомим є те, що в основі численних, нині застосовуваних, методик розрахунку швидкості виносу шламу ГП при бурінні свердловин, лежать закономірності руху кулі в рідкому або газоподібному середовищах.

Рух частинок зруйнованої ГП стовбуром споруджуваної свердловини характеризуються абсолютною швидкістю частинки V_c , яка пов'язана із середньою швидкістю потоку ПР в кільцевому просторі V_p співвідношенням [17]

$$V_p = u + V_c , \quad (2.3)$$

де u – швидкість осідання частинки шламу в нерухомій рідині (ПР), м/с.

Оскільки одна з величин V_p або V_c відома, то для визначення іншої необхідно знайти u , що залежатиме від ряду факторів; при цьому можливі різні варіанти співвідношення означених швидкостей, проілюстровані на рис. 2.4.

Рівняння руху твердої частинки в умовах її гідравлічного транспортування можна скласти виходячи із законів механіки, тобто суму всіх сил, які діють на частинку, прирівняти до сили інерції (зазначимо тут, що траєкторія частинки відома і напрямки дії всіх сил збігаються з напрямком руху частинки) [61].

З курсу фізики також відомо, що на тіло, яке занурюється в необмежену об'ємі рідини, крім сили інерції діє також сила тяжіння

$$G_T = \rho g V , \quad (2.4)$$

та, крім того, Архімедова сила

$$V_\delta = u + V_c , \quad (2.5)$$

де ρ_p і ρ – відповідно густина рідини (в конкретному випадку – застосовуваної ПР) і щільність тіла, яке занурюється, кг/м^3 ; g – прискорення сили тяжіння, м/с^2 ; V – об'єм тіла (частинки зруйнованої ГП), зануреного в рідину, м^3 .

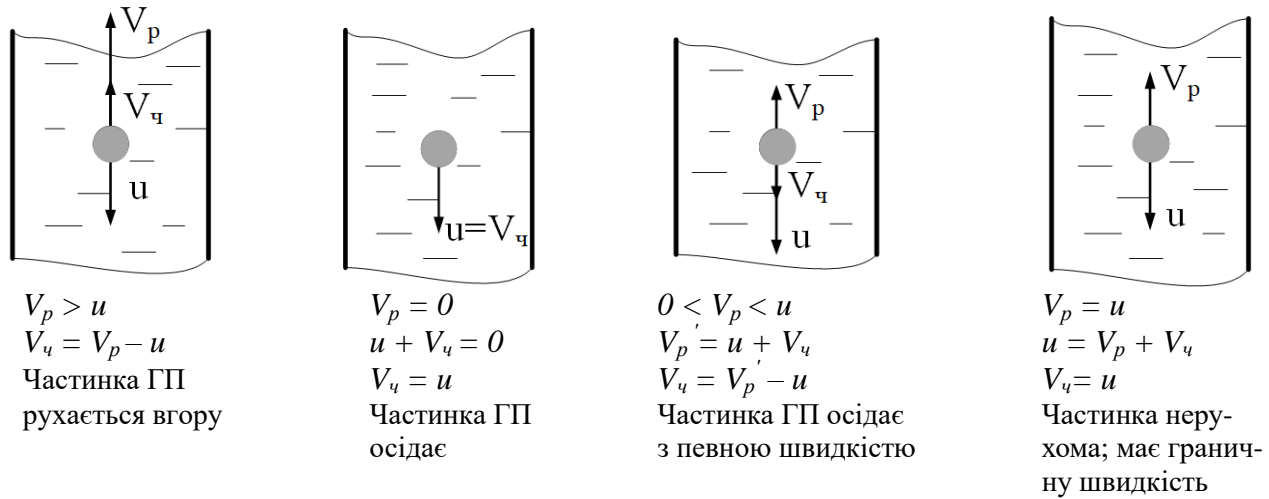


Рис. 2.4. Схематичне зображення можливих варіантів співвідношень швидкості руху рідини та осідання частинок ГП

У розвиток руху, тобто за появи відносної швидкості між тілом (частинкою ГП) і рідиною виникає сила опору, яку можна визначити за формулою

$$R = Cf \frac{\rho_p u^2}{2}, \quad (2.6)$$

де f – площа проєкції поверхні тіла на нормаль до вектора швидкості (міделевий переріз), м^2 ; C – коефіцієнт опору руху, який залежить від форми тіла і режиму обтікання; u – швидкість тіла відносно рідини, м/с .

Рівняння руху тіла під дією зазначених сил можна записати у вигляді

$$G_T - P_A - R = m_T \frac{du}{dt}, \quad (2.7)$$

де m_T – маса твердого тіла (частинки ГП), кг .

Підставляючи значення для G_T , P_A і R в рівняння (2.7) отримаємо наступне

$$m_T \frac{du}{dt} = \rho_p g V \left(\frac{\rho}{\rho_p} - 1 \right) - Cf \frac{\rho_p u^2}{2}. \quad (2.8)$$

При невстановленому русі з'являється дія сили інерції, причому відповідні розрахунки показують, що тривалість початкового періоду руху тіла зі стану спокою зазвичай мала, і його можна не брати до уваги. Таким чином рух розглядається стійким, а силу інерції в рівнянні (2.8) прирівнюють нулю, тоді

$$\rho_p g V \left(\frac{\rho}{\rho_p} - 1 \right) = Cf \frac{\rho_p u^2}{2}. \quad (2.9)$$

Після деяких нескладних перетворень з рівняння (2.9) отримуємо

$$u = \sqrt{\frac{V}{f} \left(\frac{\rho}{\rho_p} - 1 \right) \frac{2g}{C}}. \quad (2.10)$$

Для частинки кульової форми її об'єм визначається за формулою

$$V = \frac{\pi d^3}{6}, \quad (2.11)$$

де d – діаметр кулі, за значенням відповідний її розмірам, м.

Проекцією поверхні тіла у формі кулі на нормаль до вектора швидкості буде коло, площа якого визначається наступною формулою

$$f = \frac{\pi d^2}{4}. \quad (2.12)$$

Підставивши (2.11) і (2.12) в (2.10) та здійснивши перетворення, маємо

$$u = \sqrt{\frac{4g}{3C} d \left(\frac{\rho}{\rho_p} - 1 \right)}. \quad (2.13)$$

Позначивши в (2.13) рівняння $\sqrt{\frac{4g}{3C}}$ через K , отримаємо формулу, яка широко відома під назвою формули Рітінгера і досить розповсюджена в практиці інженерних гідравлічних розрахунків та режиму промивання свердловин

$$u = \sqrt{\frac{4g}{3C} d \left(\frac{\rho}{\rho_p} - 1 \right)}. \quad (2.14)$$

При визначенні швидкості осідання частинки шламу ГП в потоці ПР також рекомендують застосовувати формулу Стокса [17], яка має наступний вигляд

$$u = \frac{d^2 (\rho - \rho_p) g}{18\mu} h, \quad (2.15)$$

де μ – значення динамічної в'язкості ПР.

Зазначена формула дає задовільні результати для u , якщо число Рейнольдса при обтіканні частинки ГП не перевищує одиниці.

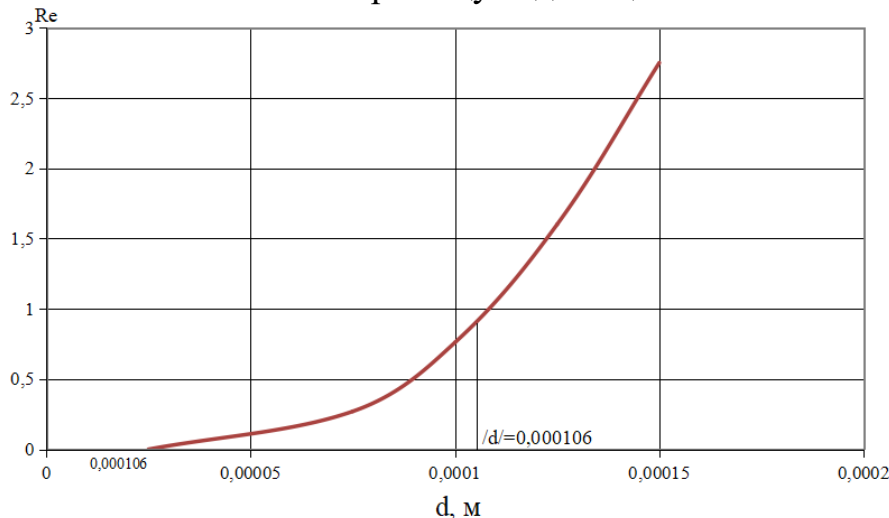


Рис. 2.5. Графік функції виду $Re = f(d)$.

Оскільки швидкість u є функцією d , можна встановити граничний діаметр частинки $/d/$, при якому число Рейнольдса не буде перевищувати одиниці, саме

для цього на рис. 2.5 представлено залежність виду $Re = f(d)$, з даних якого маємо, що параметр Re не перевищує одиниці при діаметрі частинки $1,06 \cdot 10^{-4}$ м.

У гідравлічних розрахунках транспортування твердих тіл потоком рідини також застосовують емпіричну формулу на основі параметра Архімеда Ar

$$u = \frac{v}{d} \exp 10 \left(\frac{\sqrt{\ln Ar + 2,3}}{2,3} - 1 \right), \quad (2.16)$$

де Ar – дослідний безрозмірний параметр Архімеда

$$Ar = \frac{d^3 (\rho - \rho_p)}{v^2 \rho} g. \quad (2.17)$$

Вказана формула отримана на основі логарифмічного закону критеріальної залежності, яка описує «стандартну криву» $C = f(Re)$ в діапазоні $Re = 0,5 - 10^5$.

Доречним буде зазначити, що формули, які застосовують при розрахунках відносної швидкості u не враховують вплив стінок свердловини і БТ, які обмежують кільцевий простір – канал руху частинок шламу ГП; згідно результатів проведених експериментальних досліджень вказаний вплив має місце, і з його урахуванням пропонується така формула для визначення u (для умов наявності обмеженості каналу руху частинок шламу ГП)

$$u = \sqrt{\frac{2gl}{C_l} \left(\frac{\rho}{\rho_p} - 1 \right)}, \quad (2.18)$$

де l – характерний розмір частинки шламу зруйнованої ГП, м; C_l – коефіцієнт лобового опору частинки шламу, який визначається за формулою

$$C_l = \left(\frac{D_c - d_{\text{ом}}}{l} \right)^{-0.18}, \quad (2.19)$$

де D_c і $d_{\text{ом}}$ – діаметри споруджуваної свердловини і БТ відповідно, м.

Відносно англомовних технічних видань за питаннями технології спорудження свердловин можна констатувати, що ними для розрахунку режиму промивання свердловин пропонується емпірична формула Уокера-Мейєза

$$u = \sqrt{\frac{2gd(\rho - \rho_p)}{1,12\rho_p}}. \quad (2.20)$$

Важливо також відмітити, що розглянуті формули, для проведення інженерного розрахунку процесу промивання свердловин, наводяться без зазначення їх меж застосовності, а саме: тип і технологічні параметри ПР, форма і розмір частинок продуктів руйнування ГП на вибої свердловини, тому виникає питання про те, яким саме умовам буріння вони найбільш повно відповідають та дають адекватні результати.

Виходячи з результатів аналізу літературних джерел, можна зробити підсумовуючий висновок, що для прикладних розрахунків рекомендується усереднено [4] приймати величину швидкості V_v в частці від u

$$V_v = (0,2 - 0,3)u. \quad (2.21)$$

Витрату ПР Q для забезпечення розрахованих u обчислюють за формулою:

$$Q = \frac{\pi}{4} (D_c^2 - d_{\text{ом}}^2) V_p. \quad (2.22)$$

В практиці спорудження свердловин використовують також рекомендації (табл. 2.2) відносно необхідних швидкостей висхідного потоку V_p [47].

Таблиця 2.1

Рекомендовані швидкості висхідного потоку ПР V_p

Тип ПРІ	Швидкість висхідного потоку ПР V_p при промиванні, м/с	
	водою	структурованою рідиною
Долота ріжучого типу	0,6 - 1,0	0,6 - 0,8
Шарошкові долота	0,6 - 0,8	0,4 - 0,6
Твердосплавні бурові коронки	0,25 - 0,6	0,2 - 0,5
Алмазні бурові коронки	0,5 - 0,8	0,4 - 0,6

З формул (2.3) і (2.21) витікає, що

$$V_\delta = (1,2 - 1,3) u, \quad (2.23)$$

тоді

$$u = \frac{V_\delta}{(1,2 - 1,3)}. \quad (2.24)$$

Виходячи з даних табл. 2.1 і залежності (2.24), маємо такі (табл. 2.2) розрахункові швидкості осідання частинок шламу ГП.

Таблиця 2.2

Розрахункові швидкості осідання частинок шламу ГП u

Тип ПРІ	Розрахункова швидкість осідання частинок шламу ГП u при промиванні, м/с	
	водою	структурованою рідиною
Долота ріжучого типу	0,48 - 0,8	0,48 - 0,64
Шарошкові долота	0,48 - 0,64	0,32 - 0,48
Твердосплавні бурові коронки	0,2 - 0,48	0,16 - 0,4
Алмазні бурові коронки	0,4 - 0,64	0,32 - 0,48

Розмір частинок шламу ГП при різних способах буріння характеризується значним діапазоном, а їх середній розмір залежить від багатьох факторів, серед яких найвпливовішим фактором виступає конструкція ПРІ. Саме тому частинки бурового шламу можна умовно розділити на такі групи: шлам характерний для алмазного буріння, для твердосплавного і для шарошкового.

Для аналізу ступеню відповідності розрахункових формул для визначення швидкості осідання частинок шламу ГП u реальним умов буріння, корисним буде провести якісне порівняння отримуваних за ними результатів.

Дані стосовно значень швидкості осідання частинок шламу ГП u , за розмірами характерних для алмазного способу буріння наведені на рис. 2.6.

Дані рис. 2.6 дозволяють зробити обґрунтований висновок про те, що можна виділити дві групи формул, розрахункові величини за якими значно відріз-

няються між собою. До першої групи належать формули Стокса та з урахуванням параметру Архімеда, які дають величини відносної швидкості осідання частинок шламу u , які не перевищують 0,01 м/с. До іншої групи належать формули Ріттінгера, Уокера-Мейєза та з урахуванням обмеженості руху, де u приймає граничні значення впритул до 0,06 м/с; однак вказані значення u , в будь-якому випадку, в разі менше за такі, що представлені в табл. 2.2.

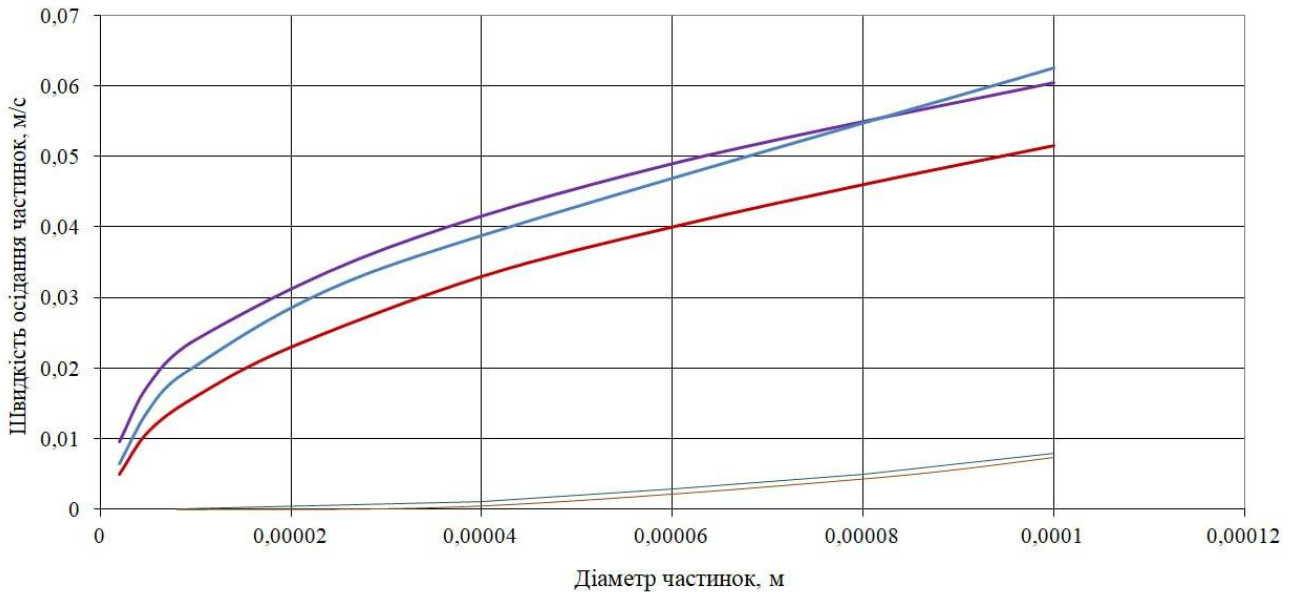


Рис. 2.6. Залежності швидкості осідання частинок шламу ГП u , характерних для алмазного буріння, від їхнього діаметру

На рис. 2.7 і 2.8 представлені розрахункові залежності осідання шламу ГП u розміром до $5 \cdot 10^{-3}$ м, який є характерним для умов твердосплавного і шарошкового буріння, зокрема долотами геологорозвідувального сортаменту.

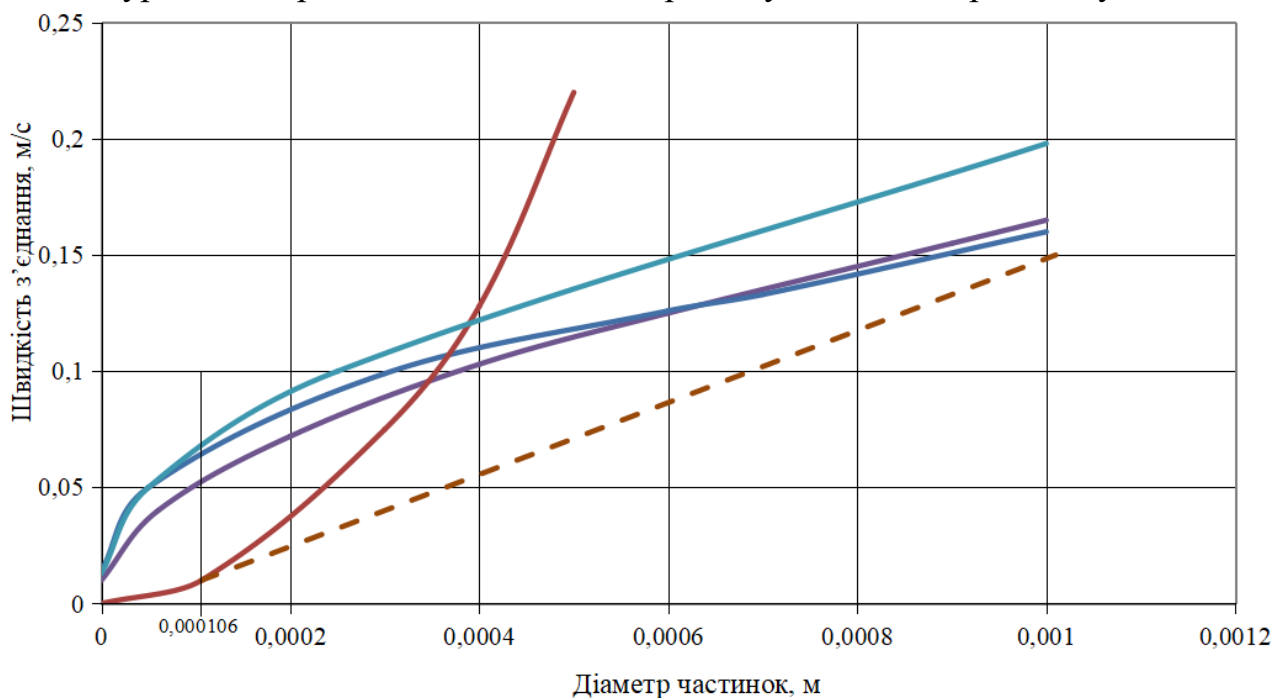


Рис. 2.7. Залежності швидкості осідання частинок шламу ГП u , характерних для твердосплавного буріння, від їх діаметру

Дані розрахунків (рис. 2.7) для твердосплавного буріння свідчать про збереження якісного характеру залежностей, встановленого для даних рис. 2.6. Тут слід зауважити, що максимальні розрахункові значення швидкості $u = 0,2$ м/с (формула Ріттінгера), тільки при крупності шламу ГП в $0,001$ м (1 мм) наближається до мінімальної рекомендованої швидкості за даними табл. 2.2; формула Стокса обмежена в значеннях крупністю шламу в $1,06 \cdot 10^{-4}$ м (рис. 2.5).

Залежності швидкості осідання частинок шламу ГП u при шарошковому бурінні (рис. 2.8) мають однаковий характер, хоча є деякі численні відмінності.

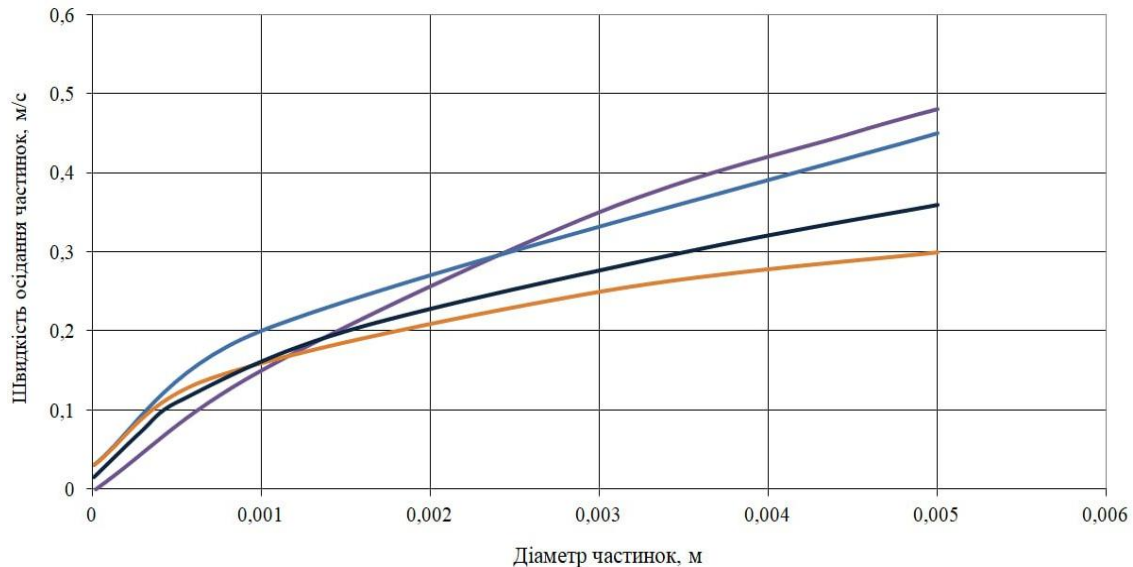


Рис. 2.8. Залежності швидкості осідання частинок шламу ГП u , характерних для шарошкового буріння, від їх діаметру

Найбільш показово наступне: всі розрахункові значення швидкості осідання частинок шламу ГП u значно нижчі, ніж дані табл. 2.2; тільки при крупності шламу ГП в 5 мм розрахункові швидкості за формулами Архімеда і Ріттінгера наближаються до мінімального значення ($0,48$ м/с) за даними табл. 2.2. Саме в такій постановці розглянуті питання потребують свого подальшого аналізу.

2.3 Визначення деяких закономірностей відносного руху керну

Роботи в області розвідувального буріння спрямовані [2], в основному, на забезпечення збереження керна, який отримують з доволі глибоких інтервалів свердловини, а основним засобом пошуків і розвідки корисних копалини, а також інженерно-геологічних досліджень [62], що дає можливість отримання з земних надр зразків ГП у вигляді кернів, є колонкове буріння; останнім виступає спосіб обертального буріння, при якому руйнування ГП здійснюється не за усією площею вибою споруджуваної свердловини, а за його кільцевою ділянкою, із збереженням внутрішньої частини – колонки ГП у вигляді керна.

Основні закономірності руху твердого тіла погано обтічної форми (яким і є керна ГП) у висхідному потоці ПР в умовах малих зазорів між керном і трубою в даний час мало вивчені, оскільки більшість дослідників в основному вивчали транспорт бурового шламу по стовбуру свердловин.

Рух ядра ГП по внутрішньому каналу подвійної БК характеризується деякою швидкістю стовпчика ядру V_k , яка пов'язана із середньою швидкістю потоку ПР в трубі ω_0 наступним співвідношенням [45]:

$$V_k = \omega_0 - u_k \quad (2.25)$$

де u_k – відносна швидкість ядру ГП (відносно рідини), м/с.

Отже, розрахунок руху ядра зводиться до рішення рівняння (2.25); виконується це за умови, що ядро ГП знаходиться в стані рівноваги, тобто сума всіх діючих на ядро сил дорівнює нулю, а рух ПР і ядра сталий (рис. 2.9).

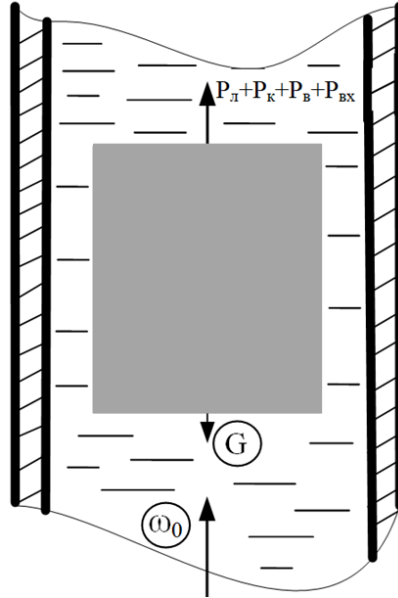


Рис. 2.9. Схема силових співвідношень при русі ядра колоною БТ

Таким чином, відносна швидкість ядру u_k знаходиться з умови рівноваги [36]:

$$P_l + P_k + P_v = G \quad (2.26)$$

де P_l – сила лобового опору при русі для стовпчика ядру, Н; P_k – сила гідравлічного опору в кільцевому зазорі між ядром і БТ, Н; P_v – сила гідравлічного опору на виході потоку ПР з кільцевого зазору «ядро - БТ», Н; G – власна вага транспортованого стовпчика ядра ГП, зануреного в ПР, Н.

$$P_l = C_x \cdot F_m \cdot \frac{\rho \cdot \omega_m^2}{2} = C_x \cdot F_m \cdot \frac{\rho}{2} (\omega_0 - V_k)^2 \cdot \frac{K_1^2}{(1 - \tau F)^2} \quad (2.27)$$

$$P_k = \frac{\lambda_k \cdot \lambda}{d_z} \cdot F_m \cdot \frac{\rho \cdot (\omega_0 - V_k)^2}{2} \cdot \frac{1}{(1 - F)^2} \quad (2.28)$$

$$P_v = \xi \cdot F_m \cdot \frac{\rho \cdot (\omega_0 - V_k)^2}{2} \cdot \frac{1}{(1 - F)^2} \quad (2.29)$$

Підставивши в рівняння (2.26) вирази, що визначають кожний з факторів руху ядру та розв'язавши його відносно швидкості u_k , отримаємо залежність:

$$u_k = \sqrt{\frac{\rho_k - \rho}{\rho} - 2gl_k \cdot \frac{(1 - F)^2}{F^2 + 0,5(F)^2 + C_x K_1^2 \left(\frac{1 - F}{1 - \tau \cdot F} \right)^2 + \frac{\lambda_k \cdot l_k}{d_z}}}, \quad (2.30)$$

де ρ_k – щільність породного ядра, кг/м^3 ; ρ – густина ПР, кг/м^3 ; g – прискорення вільного падіння, м/с^2 ; l_k – довжина ядра ГП, м ; F – відношення площі перерізу потоку ПР в трубці F_0 до міделової площі стовпчика ядра F_M (позначимо його як площинно-швидкісний коефіцієнт F); C_x – коефіцієнт лобового опору тіла, залежний від його форми і параметра Рейнольдса (рис. 2.10); K_I – коефіцієнт нерівномірності швидкості потоку по його перерізу, залежний від параметра Рейнольдса; τ – поправочний коефіцієнт, що враховує вплив форми тіла і обмеженість поперечного перерізу БТ; λ_k – безрозмірний коефіцієнт опору по довжині ядра; d_2 – гідравлічний діаметр каналу руху ядра, м .

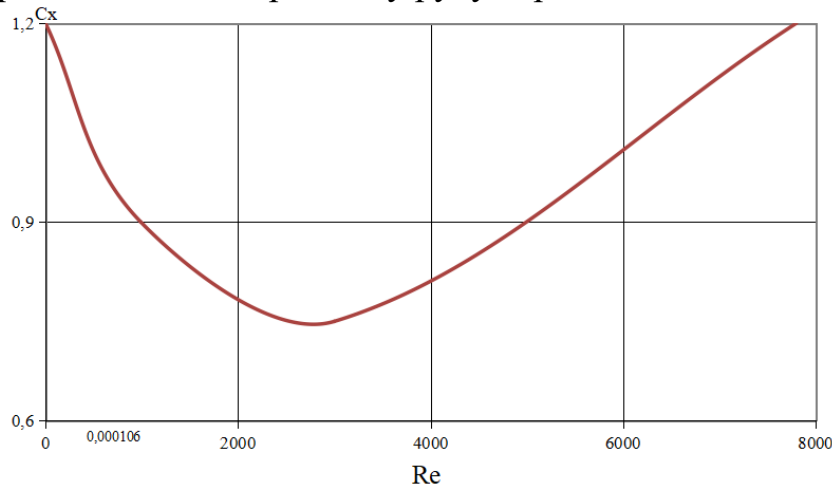


Рис. 2.10. Графічні дані для визначення коефіцієнта лобового опору C_x

Визначимо порядок розрахунку площинно-швидкісного коефіцієнту F

$$F_0 = \frac{\pi d_g^2}{4}, \tag{2.31}$$

де d_g – внутрішній діаметр центрального каналу подвійної колони БТ, м .

$$F_M = \frac{\pi d_k^2}{4}, \tag{2.32}$$

де d_k – діаметральний розмір зразків ядра ГП, транспортованих ПР по внутрішньому каналу подвійної колони БТ, м .

У табл. 2.3 наведено числові значення відношення площі перерізу потоку ПР в трубці F_0 до міделової площі стовпчиків ядра F_M , діаметр яких лежить в межах $d_k = 0,038 \div 0,042$, що характерно для більшості геологічних розрізів, які вивчаються за допомогою бурових установок із гідротранспортом ядра.

Таблиця 2.3

Числові значення площинно-швидкісного коефіцієнту F

F_M	0,00113	0,00107	0,00102	0,00096	0,00091	0,00085	0,0008	0,000875	0,00071	0,00067	0,00062
F_0	0,0014										
F	0,807	0,764	0,729	0,686	0,69	0,607	0,571	0,536	0,507	0,479	0,443

Інженерний аналіз доводить, що у формулі (2.30) не врахована сила гідравлічного опору на вході потоку ПР в кільцевий зазор «кern - БТ»; вказана сила P_{ex} , може бути визначена за формулою Вейсбаха:

$$P_{BX} = \xi \cdot F_m \frac{\rho}{2} (\omega_0 - V_k)^2 \frac{l}{(1-F)^2}, \quad (2.33)$$

де ξ – коефіцієнт місцевого гідравлічного опору; для випадку турбулентної течії ПР він залежить лише від співвідношення площ вузького і широкого перерізів F_{kn} і F_0 відповідно та обчислюється за наступною формулою:

$$\xi = 0,5 \cdot \left(1 - \frac{F_{kn}}{F_0}\right)^2 = 0,5 \cdot \left[1 - \frac{(F_0 - F_m)}{F_0}\right]^2 = 0,5 \cdot (F)^2. \quad (2.34)$$

Після деяких математичних перетворень, формула (2.30) матиме вигляд:

$$u_k = \sqrt{\frac{\rho_k - \rho}{\rho} - 2gl_k \frac{(1-F)^2}{F^2 + 0,5(F)^2 + C_x K_l^2 \left(\frac{1-F}{1-\tau F}\right)^2 + \frac{\lambda_{kn} \cdot l_k}{d_c}}}. \quad (2.35)$$

Відповідно до викладеного, з урахуванням наявності прояву сили гідравлічного опору на вході потоку ПР в кільцевий зазор «кern - БТ» P_{ex} , уточнююче рівняння (2.26) переписеться наступним чином:

$$P_l + P_k + P_e + P_{ex} = G. \quad (2.36)$$

Розглядаючи викладені результати, можемо констатувати наступне: змодельовані умови транспортування зразків кернових проб та отримано адекватний гідравлічним факторам математичний вираз схеми руху керну ГП.

2.4 Деякі експериментальні відомості про рух керну по подвійній буринній колоні

Було показано, що при бурінні свердловин з гідротранспортом керна швидкість його підйому залежить від швидкості висхідного потоку ОА (ω_0), а тому, теоретично, швидкість руху керну по висхідній магістралі можна визначити, вирішивши систему рівнянь, яка регламентує співвідношення перепадів тисків в різних частинах стовпчика керна, утворених керном і внутрішнім каналом кернопідйомної магістралі (внутрішньої труби подвійної БК), необхідних для утримання його у зваженому стані та транспортування по БТ [45].

Експериментальними дослідженнями в стендових умовах встановлено, що при різниці в діаметрах транспортного каналу та самого керна ГП, що дорівнює 3 - 10 мм, залежність між швидкістю підйому зразків V_k і швидкістю руху рідини ω_0 (при $0,8 \text{ м/с} < \omega_0 < 1,7 \text{ м/с}$) виражається лінією, подібною до прямої, похиленої до вісі абсцис під кутом, близьким до 60° . Зі збільшенням швидкості висхідного потоку ω_0 спостерігається зближення її зі швидкістю руху керну (V_k); паралельно вказаному зростає співвідношення V_k/ω_0 , причому зростання щільності транспортованих зразків керна ГП (ρ_k) не порушує цієї тенденції. Спостереження за бурінням свердловин (гідротранспортування керна) свідчать, що при швидкостях висхідного потоку в БК більше за 2 м/с швидкість руху ке-

рна ГП близька до швидкості руху потоку ПР. Пояснюється це наступним: крім гідравлічних опорів, які впливають на керн, необхідно враховувати гідравлічні опори на вході потоку в кільцевий зазор між керном і каналом труб P_{ex} , а також на виході з нього P_e . Зростання швидкості руху потоку до певної величини призводить до його турбулізації та утворення завихрень на вході в зазор між керном і транспортним каналом подвійних БТ. У вказаних умовах миттєві (елементарні) прирощення швидкості можуть призвести до того, що P_{ex} стає визначальним у сумарній величині перепаду тиску на транспортування керну ГП, тому періодично виникає «поршневий ефект», за якого швидкість руху керну наближається до швидкості руху потоку в транспортному каналі.

У діапазоні швидкостей потоку 0,4 - 0,9 м/с на графіку відносного руху керну є перегин, характерний для руху всіх випробуваних зразків і обумовлений, мабуть, зміною режиму руху рідини від ламінарного до турбулентного, при якому швидкість руху зразків зростає внаслідок завихрень потоку, а потім інтенсивність прирощення швидкості потоку дещо стабілізується.

За умов $V_k \approx \omega_0$ швидкість висхідного потоку можна вважати «ефективною», оскільки вона визначає час руху зразків до поверхні; подальше збільшення ω_0 у транспортному каналі призводить до суттєвого зростання гідравлічних опорів у БК та невиправданих витрат потужності на привід БН за досить незначного скорочення часу підйому керна ГП у транспортній магістралі БК.

Експериментально доведений такий практичний результат: для подвійних БК із внутрішнім діаметром транспортного каналу (d_e) в 35 - 54 мм, ефективні значення швидкостей висхідного потоку (ω_0) знаходяться в межах 2,5 - 2,8 м/с. Втрати тиску на підйом керна на поверхню не є причиною для обмеження глибини буріння; так при довжині зразків породи в 100 мм, глибині свердловини 100 м і швидкості буріння 100 м/год, зразки будуть відокремлятися від вибою через кожні 3,6 с і рухатися до поверхні з інтервалом 3,6 м. Перепад тиску на транспортування окремого зразка керну ГП буде дорівнювати 0,05 МПа; при цьому загальні втрати тиску на підйом всіх зразків, які одночасно рухаються на поверхню (це близько 30 шт.), складатимуть не більше 0,2 МПа.

При бурінні свердловин з гідротранспортом керну використовується бурова установка (БУ) з рухомим обертачем, що дозволяє здійснювати нарощування БТ без відриву БС від вибою; вказане забезпечує винесення всіх зразків на поверхню і майже повністю виключає можливість їх втрати в результаті випадання на вибій. Тривалість основних операцій (буріння, нарощування) зі збільшенням глибини свердловини не змінюється, в той же час очікування виносу керну (ОВК) на глибині 300 м стає порівняним з часом поглиблення інтервалу на величину БТ і в 5 - 6 разів перевищує витрати часу на нарощування наступної БТ. Пояснюється зазначене не тільки збільшенням довжини транспортного каналу, але і великими втратами ОА зі зростанням глибини, необхідністю зниження кількості закачуваної в свердловину ПР через високі гідравлічні опори, а також зростанням частоти підклинювань транспортованого керну.

При бурінні з гідротранспортом керна адекватна прив'язка отримуваних зразків до глибини їх залягання здійснюється за довжиною БК (окремі труби

якої виготовлені з точністю ± 5 см), після повного підйому зразків керну ГП на поверхню. У більшості випадків інтервал поглиблення, після якого здійснюється повний підйом зразків керну ГП на поверхню, становить 2 - 4 м, що забезпечує побудову геологічного розрізу свердловини з точністю 0,15 - 0,4 м [63].

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2

1. Наведено основні відомості щодо особливостей гранулометричного складу продуктів руйнування (шламу гірських порід), що утворюються при бурінні свердловин різним за конструкцією породоруйнівним інструментом (за певного технологічного режиму його відпрацювання) і залежно від параметрів фізико-механічних властивостей породного вибою.

2. Дано вичерпний аналіз основних факторів та аналітичних залежностей, які визначають гідравлічну програму промивання свердловини.

3. Показані суттєві розбіжності в результатах розрахунків швидкісних співвідношень за різними формулами і методиками, що дозволяє стверджувати наявність для них принципової відмінності як щодо поглядів на механізм транспортування продуктів руйнування, так і умов їх застосування (наведені аналітико-графічні дані наочно ілюструють зазначені обставини).

4. Проаналізовано математичну модель, що інтерпретує процес транспортування зразків породного керну, отриману на підставі розгляду закономірностей руху тіл циліндричної форми в обмежених умовах круглого каналу.

5. Визначено певну невідповідність формули розрахунку відносної швидкості керна u_k реальним умовам руху зразків циліндричної форми всередині центрального транспортного каналу подвійної бурильної колони; для вказаних умов отримано нову залежність, що визначає відносну швидкість керна u_k з урахуванням усіх параметрів інтегрального значення величини перепаду тиску на транспортування стовпчику керну гірської породи.

6. Коротко розглянуто експериментальні характеристики, які визначають особливості транспортування керну по подвійній бурильній колоні.

РОЗДІЛ 3. ХАРАКТЕРИСТИКА ОСНОВНИХ КРИТЕРІЇВ, ЩО ВИЗНАЧАЮТЬ РАЦІОНАЛЬНУ ВИТРАТУ ОЧИСНОГО АГЕНТА

3.1 Вплив форми та розмірів частинок шламу гірських порід на швидкість їх руху в рідині (очисному агенті)

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) [14]. 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 [29], при розрахунках швидкостей осідання частинок шламу ГП, враховувати їх форму за допомогою параметра δ , який характеризує ступень сплюснутості частинок і визначається так

$$\delta = \frac{t}{d}, \quad (3.1)$$

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.

Слід також додати і те, що співвідношення (2.14) отримано з умови наявності у частинок зруйнованої ГП кулеподібної форми, а це далеко не у всіх випадках руйнування ГП при бурінні точно витримується.

Наведемо такий приклад [64]: 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.

Повертаючись до передумов складання виразу (2.13) нагадаємо, що співвідношення $\sqrt{\frac{4g}{3C}}$, позначене через K , отримано з аналізу геометричних характеристик кулеподібного тіла, а саме K є, крім іншого, функцією площі проекції поверхні тіла у формі кулі на нормаль до вектора швидкості.

Таким чином, за допомогою означеного коефіцієнта K враховують різні форми частинок шламу ГП, серед яких виділяють наступні основні: куля, куб, диск або циліндр і паралелепіпед. Неважко помітити, що K виступає також і функцією коефіцієнта опору руху частинки C , який необхідно знати, щоб визначити K . В свою чергу C є функцією числа Рейнольдса [36]. Проте визначення величини C становить певну складність, оскільки потребує знання особливостей руху частинки довільної форми в рідині. Графічна залежність $C = f(Re)$ для визначення коефіцієнта C для різних геометричних форм (рис. 3.1) була отримана шляхом значних за об'ємом експериментальних досліджень. Однак використовувати цю залежність коректно не представляється можливим, оскільки необхідно заздалегідь знати швидкість осідання частинки.

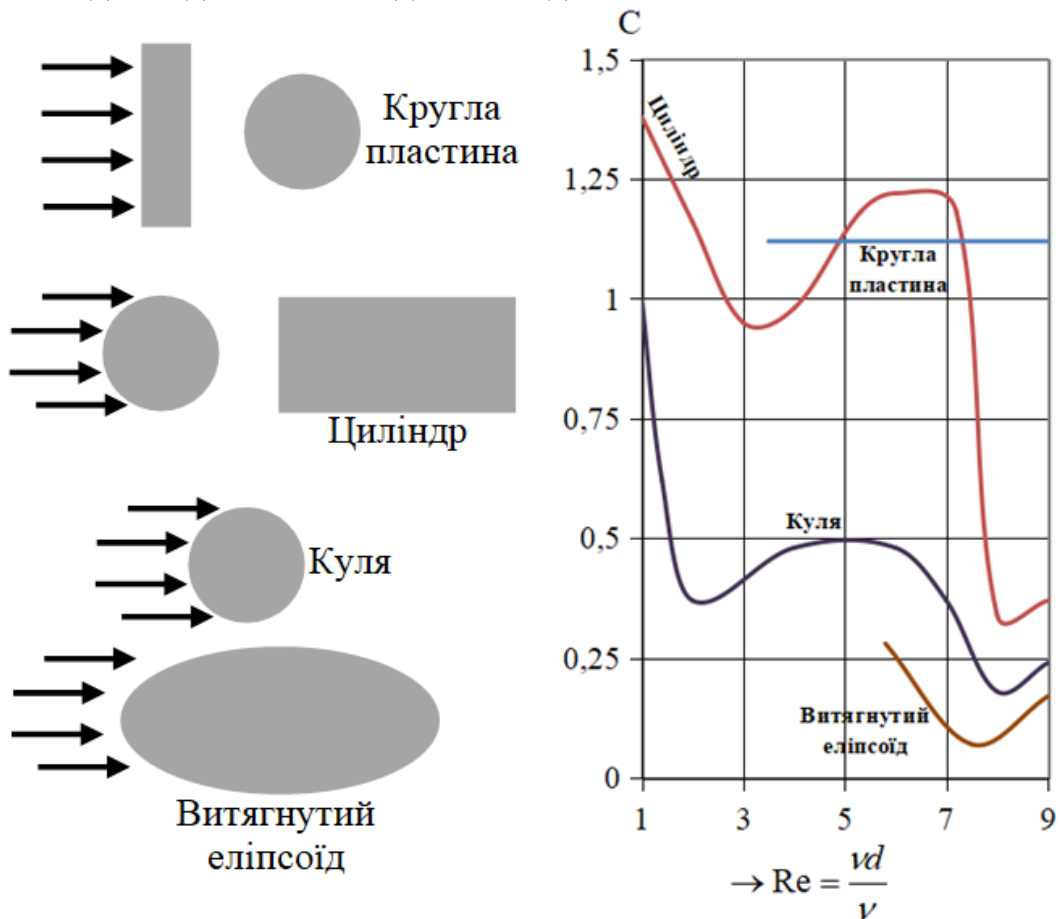


Рис. 3.1 Графічні залежності для визначення коефіцієнта C з умови $C = f(Re)$

Отримано також числові значення коефіцієнта C (табл. 3.1), при осіданні твердих частинок у воді, для умов гідротранспорту. Порівнюючи запропоновані величини коефіцієнта C із його значеннями згідно рис. 3.1, можна побачити, що вони істотно розходяться; крім того, для приведених значень C жодним чином не вказано критерії вибору того чи іншого числового еквіваленту коефіцієнта.

Таблиця 3.1

Значення коефіцієнта опору руху частинки C для деяких форм твердих тіл

Форма тіла, що рухається в рідині	Коефіцієнт опору руху частинки C
Куля з гладкою поверхнею	0,38 - 0,44
Куля з шорсткою поверхнею	0,62 - 0,66
Куб	1,0 - 1,2
Гравій добре окатаний	0,8 - 1,3
Вугілля кускової, кубоподібної форми, окатане	1,0 - 1,4
Порода кускова, кубоподібної форми	1,1 - 1,5

Пропонується також користуватися безпосередньо залежністю величини C від розміру транспортованого матеріалу. Вказана залежність знаходиться шляхом підстановки в рівняння (2.9) величини u з виразу числа Рейнольдса

$$u = \frac{\nu Re}{d}, \quad (3.2)$$

де ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості рідини, $\text{м}^2/\text{с}$.

В результаті вказаної підстановки будемо мати

$$C = \frac{4g}{3Re^2 \nu^2} d^2 \left(\frac{\rho}{\rho_p} - 1 \right). \quad (3.3)$$

Долучаючи до аналізу значення C і порядок розрахунку величини Re за графіком (рис. 3.1), можна спочатку отримати залежність $C = f(d)$ у вигляді таблиці, а потім побудувати графік; прикладом такого підходу є графічні залежності виду $C = f(d)$ для кулі і частинок вугілля, отримані вказаним способом.

Для проведення розрахунків також пропонується, безпосередньо, конкретні значення коефіцієнта K : для кулеподібних частинок $K = 4,5 - 5,1$; для округлих і компактних $K = 3,5 - 4,5$; для частинок подовженої форми $K = 2,0 - 3,5$.

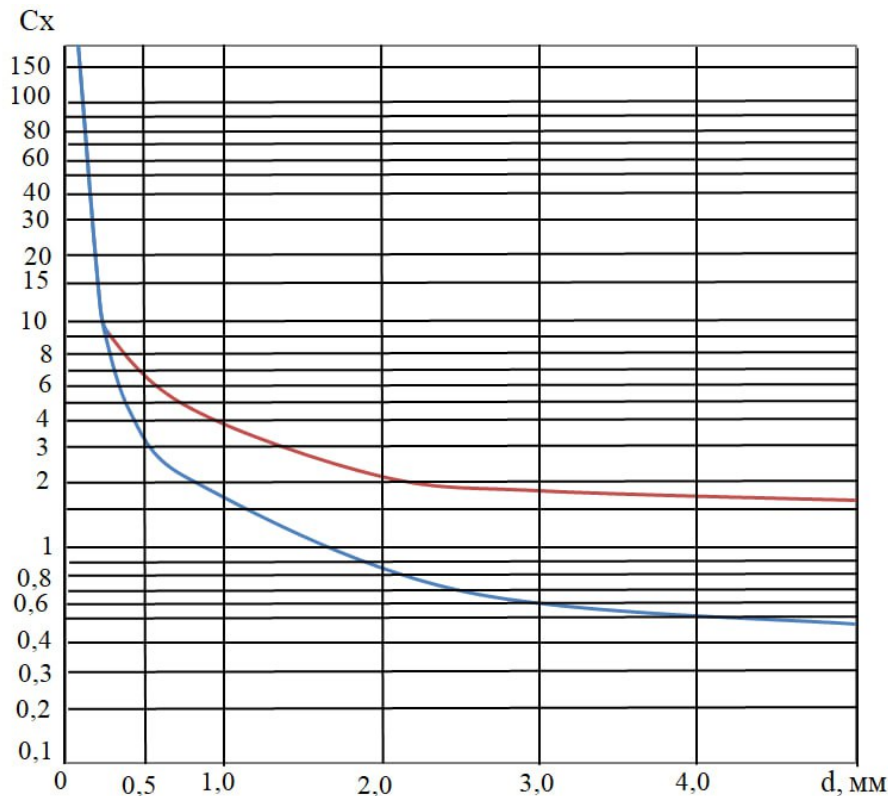
Зазначимо, що цілком очевидним є наступне

$$C = \frac{4}{3} \frac{g}{K^2}. \quad (3.4)$$

Підставляючи вказані величини K у формулу (3.4), ми отримаємо значення коефіцієнта C . Звідки, для кулеподібних частинок $C = 0,5 - 0,8$; для круглих і компактних $C = 0,8 - 1,07$; для частинок подовженої форми $C = 1,07 - 3,27$.

Спеціальними дослідженнями [14] було встановлено, що при малих (менше 10) значеннях критерію Re тверді частинки осідають в рідині «ребром». При великих значеннях Re осідання всіх частинок відбувається в такому їх положенні, при якому досягаються мінімальні витрати енергії, а вони, зазвичай, пов'язані з малою швидкістю руху частинок. Іншими словами, в першому випадку частинка розвертається при осіданні так, щоб площа її мінімального міделєвого перерізу розташовувалась горизонтально, у другому випадку – нормально вектору швидкості розташований її максимальний міделєвий переріз.

Наведені відомості є достатнім обґрунтуванням того, що не може називатися коректною заміна величини V в формулі (2.10) виразом для визначення об'єму кулі, а значення f – виразом для розрахунку площі кола, при знаходженні швидкості осідання частинок, форма яких відрізняється від кулеподібної.

Рис. 3.2 Залежність коефіцієнта опору C від розмірів твердих тіл [89]

Таким чином, для визначення швидкості осідання u частинок кулеподібної форми, у всіх випадках, може бути застосоване співвідношення (2.13), інші форми осідаючих частинок потребують відповідних його уточнень.

Відмічені уточнення потребують для своєї імплементації введення поняття характерного розміру частинки твердого тіла

$$l = \frac{V}{f}. \quad (3.5)$$

З урахуванням (3.5) залежність (2.10) прийме наступний вид

$$u = \sqrt{l \left(\frac{\rho}{\rho_p} - 1 \right) \frac{2g}{C}}. \quad (3.6)$$

Деяко перетворена формула (3.6) дозволить, у ході подальших міркувань, отримати математичні залежності для u різних форм. При визначенні швидкості осідання частинок твердого тіла у формі куба, диска (під диском розуміється циліндр з висотою меншою, ніж діаметр його основи), циліндра або паралелепіпеда, як було показано вище, можливі різні за розташуванням у просторі сторін частинки твердого тіла випадки осідання. В табл. 3.2 наведено можливі варіанти орієнтації частинок різної форми при їх осіданні в рідині та формули для визначення площ горизонтальних проєкцій і об'ємів цих частинок [57]. У табл. 3.3 зведено аналітичні залежності для визначення характерних розмірів l різних за геометричними параметрами частинок, а також формули для розрахунку швидкості осідання частинок з урахуванням їх форми (за даними гранулометрії продуктів руйнування бурових свердловин) [65].

Таблиця 3.2

Математичні залежності, що характеризують процес осідання частинок

Форма частинок твердого тіла	Елемент геометрії форми частинки, який розміщений перпендикулярно вектору швидкості	Формула для визначення площі проєкції частинки на горизонтальну площину	Формула для визначення об'єму частинки, що осідає	Примітки
Куб	Грань	$f = a^2$	$V = a^3$	a – довжина грані куба, м
	Ребро	$f = a^2 \sqrt{2}$		
Диск (циліндр)	Основа	$f = \frac{\pi d_o^2}{4}$	$V = \frac{\pi d_o^2}{4} H$	d_o – діаметр основи диска (циліндра), м, H – висота диска (циліндра), м
	Твірна	$f = d_o H$		
Паралелепіпед	Основа	$f = cd$	$V = cdh$	c і d – довжина сторін прямокутника, що лежить в основі паралелепіпеда, м, h – висота ребра паралелепіпеда, м
	Грань	$f = dh$		

Таблиця 3.3

Характерні розміри частинок і формули для визначення швидкості їх осідання

Геометрична форма частинки твердого тіла	Елемент геометрії форми частинки, який розміщено перпендикулярно вектору швидкості	Формула, що визначає характерний розмір l	Формула для визначення швидкості осідання частинки твердого тіла
Куб	Грань	$l = a$	$u = \sqrt{a \left(\frac{\rho}{\rho_p} - 1 \right) \frac{2g}{C}}$
	Ребро	$l = a\sqrt{2}$	$u = \sqrt{a\sqrt{2} \left(\frac{\rho}{\rho_p} - 1 \right) \frac{2g}{C}}$
Диск (циліндр)	Основа	$l = H$	$u = \sqrt{H \left(\frac{\rho}{\rho_p} - 1 \right) \frac{2g}{C}}$
	Твірна	$l = \frac{\pi d_o}{4}$	$u = \sqrt{\frac{\pi d_o}{4} \left(\frac{\rho}{\rho_p} - 1 \right) \frac{2g}{C}}$
Паралелепіпед	Основа	$l = h$	$u = \sqrt{h \left(\frac{\rho}{\rho_p} - 1 \right) \frac{2g}{C}}$
	Грань	$l = c$	$u = \sqrt{c \left(\frac{\rho}{\rho_p} - 1 \right) \frac{2g}{C}}$

Слід зазначити такий важливий висновок: отримані аналітичні вирази можуть бути використані не тільки в практичних розрахунках процесів спорудження свердловин; також вони будуть корисні і в суміжних галузях, наприклад, в збагаченні корисних копалин [57], гідравлічному транспортуванні тощо.

3.2 Вивчення особливостей підходів до порядку визначення витрати очисного агента при спорудженні свердловин

Теоретично і практично доведено, що раціональна витрата ОА, що подається на вибій споруджуваної свердловини, повинна забезпечувати найкращі результати буріння в даних геолого-технічних умовах; при її виборі повинно враховуватися все різноманіття наслідків впливу ОА на хід процесів, що протікають на вибої і в стовбурі свердловини, їх позитивні і негативні сторони [66].

При бурінні з використанням рідинних ОА (промивальних рідин), охолодження ПРІ забезпечується за найменших витратах ПР і не визначає мінімум витрати, він, в цьому випадку, вибирається з умови якісного очищення вибою споруджуваної свердловини і виносу шламів по її стовбуру.

Критеріями визначення мінімальної витрати ПР, зокрема, виступають: величина швидкості висхідного потоку, питома витрата на одиницю діаметра ПРІ; конкретні величини витрати для кожного типу і розміру ПРІ, а також властивостей ГП [4]. Технологічно необхідна швидкість висхідного потоку ПР V_p , яка забезпечує винос шламів ГП з вибою свердловини, визначається на підставі (2.3), а необхідну витрату ПР Q , для створення розрахованих u , обчислюють за (2.22); згідно сучасної практики спорудження свердловин, швидкість u у формулі (2.3) обраховують, у багатьох випадках, за формулою (2.13). Крім того, в практиці спорудження свердловин широко використовують рекомендації щодо необхідної швидкості висхідного потоку ПР V_p (табл. 2.1).

Обчислена швидкість виносу частинок V_q повинна забезпечити достатню чистоту кільцевого простору стовбура свердловини, яка залежить від рівня допустимого збагачення об'єму ПР в кільцевому просторі свердловини частинками твердого тіла (шламом ГП), що, в свою чергу, залежить від механічної швидкості буріння; згідно вказаного, величину V_q можна наступним чином

$$V_q = \frac{f_z V_m (\rho - \rho_p)}{f_{kn} \lambda (\rho_{kn} - \rho)}, \quad (3.7)$$

де f_z і f_{kn} – площі перерізу вибою і кільцевого простору між стінками свердловини і БТ відповідно, м²; V_m – механічна швидкість буріння, м/с; λ_{kn} – коефіцієнт, що враховує гвинтоподібний рух частинок у висхідному потоці в процесі буріння; ρ_{kn} – густина ПР, що рухається в кільцевому просторі, кг/м³.

Згідно з існуючими рекомендаціями, різниця густин низхідного і висхідного потоку ПР не повинна перевищувати 10 кг/м³ для ньютонівської рідини, а для в'язко-пластичної рідини вона знаходиться в межах 20 - 30 кг/м³ [67].

Розглянемо особливості розробки гідравлічної програми промивання свердловин, в аспектах встановлення раціональної витрати ПР, на прикладі застосу-

вання ПРІ геологорозвідувального сортаменту [2]. При проектуванні режиму промивання розвідувальних свердловин широко використовують рекомендовані значення питомої витрати ПР на 1 мм діаметра ПРІ; необхідну подачу БН в цьому випадку визначають з наступного співвідношення

$$Q = q_n D_n, \quad (3.8)$$

де q_n – мінімальна питома витрата ПР на 1 мм зовнішнього діаметра ПРІ, л/хв; D_n – зовнішній діаметр ПРІ (бурове долото, коронка), мм.

У табл. 3.4 наведено значення рекомендованої мінімальної питомої витрати ПР q_n (л/хв) на 1 мм діаметра для твердосплавних коронок [4].

Таблиця 3.4

Рекомендовані мінімальні значення питомої витрати q_n ПР, л/хв

Категорія порід за твердістю (буримістю)	Особливості конструктивного виконання елементів озброєння твердосплавних бурових коронок		
	Рєбристі	Різцеві	Самозаточувальні
I - II	0,8 - 1,4	-	-
III - IV	1,2 - 1,6	1,2 - 1,6	-
V	-	0,8 - 1,6	0,8 - 1,4
V - VI	-	0,8 - 1,2	0,8 - 1,2
VII - VIII	-	0,6 - 0,8	0,6 - 0,8

У табл. 3.5 - 3.6 представлено числові значення рекомендованих витрат ПР Q при твердосплавному бурінні, розраховані на основі: необхідності створення потрібних швидкостей висхідного потоку в затрубному просторі (табл. 2.1); мінімальної питомої витрати q_n на 1 мм діаметра коронки (табл. 3.4).

Таблиця 3.5

Значення витрати ПР Q , розраховані з умови створення необхідної швидкості V_p в затрубному просторі, л/хв

Діаметр коронки, мм	Тип застосовуваної ПР	
	Вода	Глинистий розчин
151	265 - 635	212 - 529
132	189 - 454	151 - 378
112	144 - 346	115 - 288
93	86 - 207	69 - 173
76	47 - 112	37 - 94
59	8 - 19	6 - 16
46	5 - 12	4 - 10

Проаналізувавши представлені дані (табл. 3.5 і 3.6), нескладно побачити, що величини витрат рідини Q , отримані з умови забезпечення необхідної швидкості в затрубному просторі в 2 - 3 рази перевищують такі, отримані за рекомендаціями табл. 3.4 (питома витрата на 1 мм діаметра коронки). Зі зменшенням діаметра коронки спостерігається зворотне – значення величин витрат отриманих за рекомендаціями питомої витрати на 1 мм коронки значно вище величин витрат отриманих з умови забезпечення необхідної швидкості в затрубному просторі. Істотні розбіжності у величинах витрат зберігаються і для подібного аналізу циркуляційних процесів алмазного і шарошкового буріння [10].

Таблиця 3.6

Значення витрати ПР, розраховані за питомою витратою q_n на 1 мм діаметра твердосплавної коронки, л/хв

Діаметр коронки, мм	Категорія порід за твердістю (буримістю)							
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
Ребристі								
151	121 - 211	121 - 211	181 - 242	181 - 242	-	-	-	-
132	106 - 185	106 - 185	158 - 211	158 - 211	-	-	-	-
112	90 - 157	90 - 157	134 - 179	134 - 179	-	-	-	-
93	74 - 130	74 - 130	112 - 149	112 - 149	-	-	-	-
Різцеві								
151	-	-	181 - 242	181 - 242	121 - 242	121 - 182	121 - 182	91 - 121
132	-	-	158 - 211	158 - 211	106 - 211	106 - 158	108 - 158	79 - 106
112	-	-	134 - 179	134 - 179	90 - 179	90 - 134	90 - 134	67 - 90
93	-	-	112 - 149	112 - 149	74 - 149	74 - 112	74 - 112	56 - 74
76	-	-	91 - 132	91 - 132	61 - 122	61 - 91	61 - 91	46 - 61
59	-	-	71 - 94	71 - 94	47 - 94	47 - 71	47 - 71	35 - 47
46	-	-	55 - 74	55 - 74	37 - 74	37 - 55	37 - 55	28 - 37
Самозаточувальні								
112	-	-	-	-	90 - 157	90 - 134	90 - 134	67 - 90
93	-	-	-	-	74 - 130	74 - 112	74 - 112	59 - 74
76	-	-	-	-	61 - 106	61 - 91	61 - 91	46 - 61
59	-	-	-	-	47 - 83	47 - 71	47 - 71	35 - 47
46	-	-	-	-	37 - 64	37 - 55	37 - 55	28 - 37

У табл. 3.7 наведено результати розрахунку V_c за формулою (3.7) для свердловини одноколонної конструкції, виходячи з умови застосування ПРІ геологорозвідувального сортаменту діаметром 76 мм. Значення ρ прийнято рівним 2500 кг/м^3 , густина ПР становить 1200 кг/м^3 . Представлені дані свідчать про те, що рекомендовані параметри для розрахунку V_c не відповідають практиці. Так, наприклад, при бурінні долотом в породах VIII категорії і промивкою водою, швидкість виносу частинок шламу на поверхню становить $0,09 \text{ м/с}$. За такої швидкості виносу, шлам, при глибині свердловини 1000 м , почне надходити на поверхню тільки після трьох годин від початку буріння. Розрахункова швидкість виносу шламу знижується зі зростанням категорії породи. Значення V_c при застосуванні води дещо вище, ніж при промиванні глинистим розчином.

Таблиця 3.7

Результати розрахунку швидкості виносу шламу (V_c) для свердловини одноконструкційної конструкції, споруджуваної із застосуванням ПРІ геологорозвідувального сортаменту діаметром 76 мм

Тип ПР	Конструкція ПРІ	Категорія порід за твердістю (буримістю)											
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Вода	Твердосплавна коронка	1,52	0,74	0,45	0,25	0,17	0,12	0,11	-	-	-	-	-
	Алмазна коронка	-	-	-	-	-	0,33	0,32	0,26	0,16	0,1	0,065	0,033
	Шарошкове долото	1,52	0,74	0,45	0,25	0,17	0,12	0,11	0,09	0,056	0,035	0,023	0,012
Глинистий розчин	Твердосплавна коронка	0,53	0,26	0,16	0,09	0,06	0,04	0,038	-	-	-	-	-
	Шарошкове долото	0,53	0,26	0,16	0,09	0,06	0,04	0,038	0,031	0,019	0,012	0,008	0,004

Оскільки шлам бурових свердловин представлений частинками різних розмірів, для кожного виду ПРІ встановлено середні його розміри; проте окремі частинки на вибої можуть бути більше середнього розміру в 3 - 5 разів – вказане, на думку фахівців, не має помітного впливу на хід процесів очищення свердловини, так як ці крупні частинки шламу ГП, піднімаючись над вибоєм, піддаються впливу бічних поверхонь рухливого БС, ним подрібнюються і вже, потім транспортуються потоком ОА на поверхню [26].

Застосовуючи в розрахунках значення середніх розмірів частинок шламу ГП, характерних для кожного виду ПРІ, в табл. 3.8 представлені результати обчислення швидкостей u , V_c і V_p для зазначених розмірів шламу ГП.

Таблиця 3.8

Результати розрахунку швидкостей осідання частинок шламу ГП, виносу частинок шламу і необхідних швидкостей висхідного потоку ПР

Конструктивне виконання ПРІ	Середній розмір частинок шламу ГП, мм	Результати (усереднені) розрахунку відповідних швидкостей		
		u , м/с	V_c , м/с	V_p , м/с
Твердосплавна коронка	0,5	0,14	0,04	0,17
Алмазна коронка	0,075	0,05	0,014	0,07
Шарошкове долото	3,0	0,3	0,04	0,43

Як видно з даних табл. 3.8 V_c отримані за формулою Ріттинґера (2.14), для шламу твердосплавного та алмазного буріння нижче наведених в табл. 3.7, і тільки значення V_c для шарошкового буріння наближаються до даних табл. 3.7.

З аналітичних методів визначення витрат ПР знаходить застосування такий, заснований на визначенні концентрації твердих частинок C_{me} , виходячи зі співвідношення між їх об'ємом і об'ємом рідини в кільцевому просторі [14]:

$$C_{me} = \frac{D_c^2}{D_c^2 - d_{\text{от}}^2} \frac{V_m}{V_c}, \quad (3.9)$$

З виразу (3.9) ми можемо отримати формулу для визначення швидкості V_q

$$V_q = \frac{D_c^2}{D_c^2 - d_{\text{ом}}^2} \frac{V_m}{C_{m\text{в}}}. \quad (3.10)$$

Щодо вибору максимально допустимої концентрації шламу ГП існують такі рекомендації: у випадку застосування в якості ПР води або іншої ньютонівські рідини, максимальна $C_{m\text{в}}$ становить 0,02; при промиванні свердловини глинистим розчином або іншими неньютонівськими рідинами $C_{m\text{в}} = 0,05$.

Відповідно до даних літературних джерел стосовно проєктування гідравлічної програми промивання, маємо такі значення швидкості руху V_q (табл. 3.9), отримані виходячи з рекомендованих швидкостей висхідного потоку [4].

Таблиця 3.9

Рекомендовані абсолютні швидкості руху частинок

Конструкція ПРІ	Абсолютна швидкість руху частинок ГП при промиванні, м/с	
	Водою	Глинистим розчином
Твердосплавні коронки	0,05 - 0,12	0,04 - 0,1
Алмазні коронки	0,1 - 0,16	-
Шарошкові долота	0,12 - 0,16	0,08 - 0,12

У табл. 3.10 представлені значення середніх розмірів частинок шламу характерних для кожного виду ПРІ та розраховані значення u , V_q і V_p для зазначених розмірів, за умови промивання свердловини водою ($\rho_p = 1000 \text{ кг/м}^3$) і глинистим розчином ($\rho_p = 1200 \text{ кг/м}^3$), значення ρ приймається рівним 2500 кг/м^3 .

Таблиця 3.10

Розрахункові значення швидкостей осаду, виносу частинок шламу і швидкості висхідного потоку очисного агента при промиванні свердловини водою і глинистим розчином

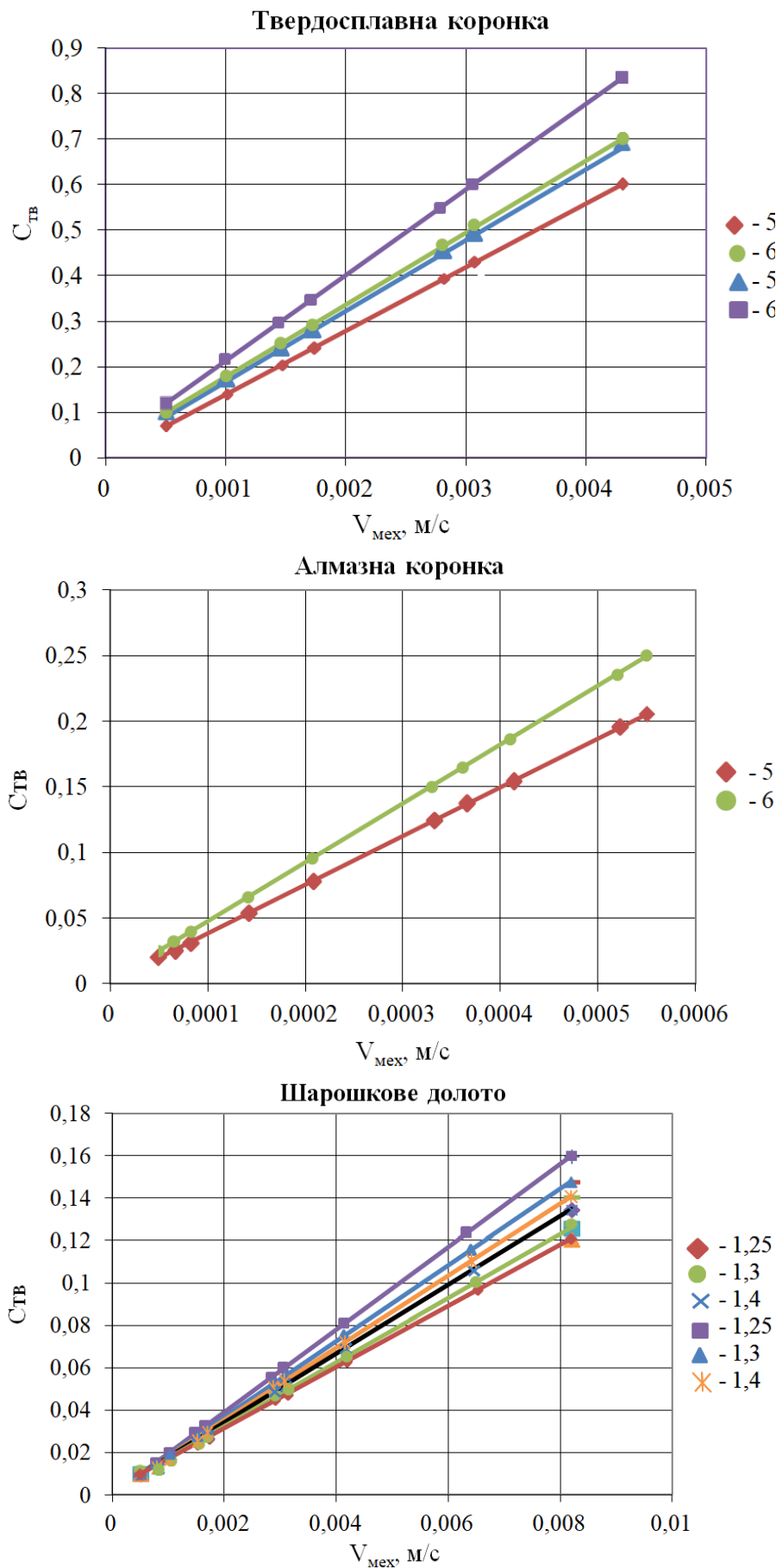
Конструктивне виконання ПРІ	Середній розмір частинок шламу ГП, мм	Результати розрахунку відповідних швидкостей		
		u , м/с	V_q , м/с	$V_{\text{ж}}$, м/с
Промивка водою				
Твердосплавна коронка	0,5	0,139	0,028 - 0,042	0,167 - 0,181
Алмазна коронка	0,075	0,054	0,011 - 0,016	0,065 - 0,07
Шарошкове долото	3,0	0,343	0,069 - 0,1	0,412 - 0,443
Промивка глинистим розчином				
Твердосплавна коронка	0,5	0,119	0,024 - 0,036	0,143 - 0,155
Кулеподібне долото	3,0	0,291	0,058 - 0,087	0,349 - 0,378

Позначивши у виразах (3.9) і (3.10) відношення $\frac{D_c^2}{D_c^2 - d_{\text{ом}}^2}$ через m , отримуємо наступні розрахункові формули:

$$C_{m\text{в}} = m \frac{V_m}{V_q} \quad (3.11)$$

та

$$V_q = m \frac{V_m}{C_{m\text{в}}}. \quad (3.12)$$

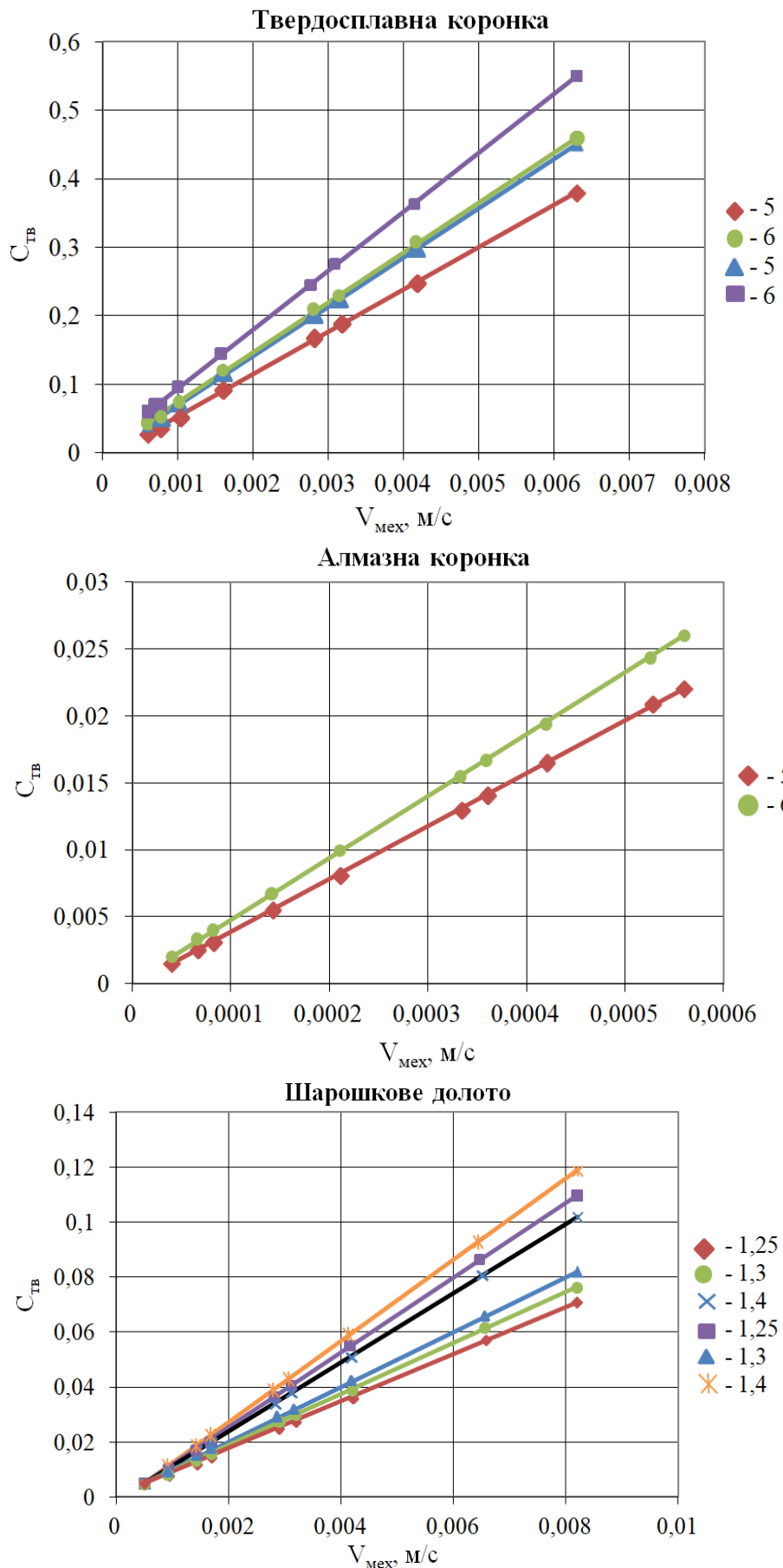


Для свердловин геологорозвідувального буріння, що проходять шарошковими долотами, m знаходиться в межах $1,25 \div 1,4$, а у випадку застосування алмазного і твердосплавного ПРІ (бурових коронки), m становить $5 \div 6$ [2].

Таким чином, об'ємний вміст твердих частинок в ПР, що знаходиться в кільцевому просторі визначається співвідношенням діаметрів свердловини і БТ, механічною швидкістю буріння і абсолютною швидкістю руху частинок шламу ГП, визначеною співвідношеннями (2.3), (2.14) і (2.21), або рекомендаціями щодо значень необхідної швидкості висхідного потоку.

На рис. 3.3 і 3.4 представлені результати розрахунку об'ємного вмісту твердих частинок ($C_{тв}$) для різних значень параметру m , залежно від механічної швидкості буріння, характерної для кожного окремого типу ПРІ (відповідно до категорії твердості ГП).

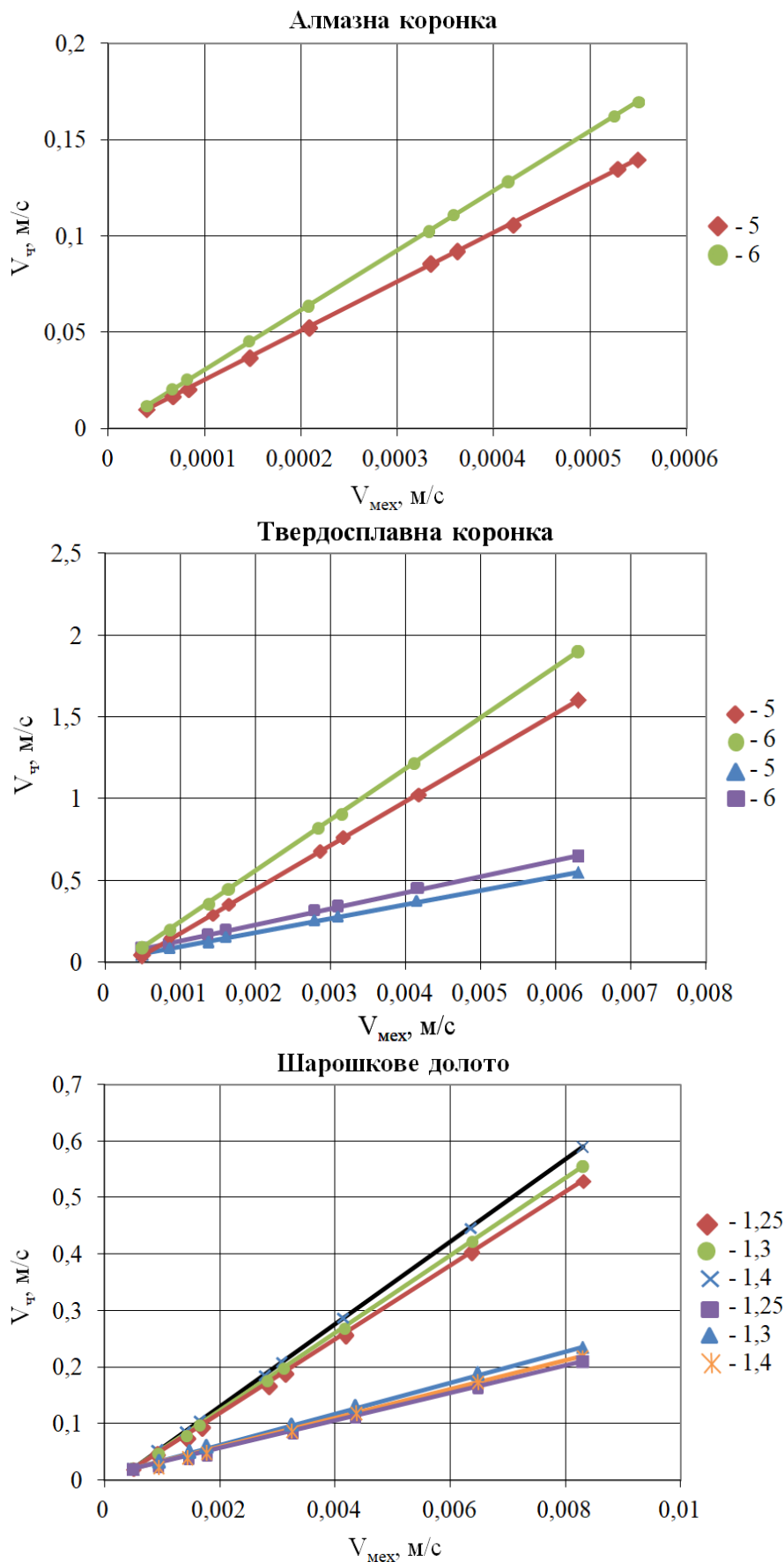
Рис. 3.3. Результати розрахунку об'єму (концентрації) частинок шламу в кільцевому просторі виходячи зі значень швидкості осідання



Розрахунки виконані з умови, що буріння шарошковими долотами здійснюється в породах I - VII категорій за буримістю, твердосплавними – в породах II - VII, алмазними – в породах VII - XII.

Дані рис. 3.3 і 3.4 свідчать про те, що зі зростанням механічної швидкості буріння концентрація частинок шламу в ПР суттєво перевищує рекомендовані значення. В разі визначення об'ємного вмісту частинок шламу ГП в кільцевому просторі виходячи зі швидкості осідання (див. рис. 3.3), тільки в породах XII категорії, що руйнуються алмазним ПРІ, в породах IV - VII за використання твердосплавного ПРІ (при промиванні водою), а також у породах III - VII (при промиванні глинистим розчином) і застосуванні шарошкового ПРІ, спостерігається відповідність розрахункових значень об'ємного вмісту частинок шламу ГП в кільцевому просторі рекомендованим граничним значенням $C_{\text{ТВ}}$.

Рис. 3.4. Результати розрахунку об'єму (концентрації) частинок шламу в кільцевому просторі виходячи з рекомендованих швидкостей висхідного потоку



При визначенні об'ємного вмісту $C_{тв}$ ГП у кільцевому просторі, виходячи з необхідності створення певних швидкостей висхідного потоку (див. рис. 3.4), повна відповідність рекомендованим значенням $C_{тв}$ спостерігається лише для умов алмазного буріння; для твердосплавного – $C_{тв}$ перевищує рекомендовані значення в разі промивання водою, та тільки в породах VI - VII категорій за буримістю при промиванні глинистим розчином, $C_{тв}$ лежить в рекомендованих межах. При шарошкочовому бурінні $C_{тв}$ виходить за рекомендовані межі тільки при бурінні в породах I - III категорій за буримістю при промиванні водою, а також в породах I - II категорій при промиванні глинистим розчином.

На рис. 3.5 представлені графічні результати розрахунку абсолютної швидкості руху частинок шламу ($V_{ш}$) залежно від досягнутих механічних швидкостей буріння, з урахуванням гранично допустимої об'ємної частки шламу в кільцевому просторі $C_{тв}$, для різних значень t та типів ПР.

Рис. 3.5. Результати розрахунку абсолютної швидкості руху частинок шламу виходячи з рекомендацій щодо гранично допустимого об'ємного вмісту (концентрації) частинок шламу в кільцевому просторі

Дані розрахунків (див. рис. 3.5) свідчать про те, що значення абсолютної швидкості руху частинок шламу, отримані виходячи з гранично допустимого вмісту твердих частинок у кільцевому просторі, не відповідають як значенням V_c отриманим виходячи зі швидкості осідання, так і таким, отриманим виходячи з рекомендованих швидкостей висхідного потоку ПР [2].

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3

1. Детально проаналізовано основні фактори впливу геометричної форми частинок шламу гірських порід на закономірності, що визначають механізм їх руху в стовбурі споруджуваної в складних умовах свердловини.

2. Розглянуті питання необхідності відображення в циркуляційних розрахунках транспортування частинок зруйнованої гірської породи особливостей їх форми, розміру та певних фізико-механічних характеристик.

3. Аналітичним шляхом отримано групу формул, що визначають швидкості осідання частинок шламу гірських порід в рідині, які максимально враховують як форму, так і розмір продуктів руйнування вибою бурових свердловин, однаково придатних також і для умов проведення гравітаційного збагачення корисних копалин, гідравлічного транспортування тощо.

4. Вивчені методики визначення швидкісних характеристик потоку очисного агента, засновані на певних механо-гідравлічних взаємодіях в системі «породоруйнівний інструмент - потік рідини - буровий насос».

5. Вказано на ряд суттєвих невідповідностей у формулах визначення швидкості руху частинок шламу реальним свердловинним умовам, що свідчить про їх специфічність і застосовність тільки у відповідних умовах.

6. Проведено порівняльний аналіз розрахункових швидкостей руху частинок шламу гірських порід з огляду на снування обмежень щодо гранично допустимого об'ємного вмісту продуктів руйнування в потоці промивальної рідини.

РОЗДІЛ 4. ВИВЧЕННЯ ДЕЯКИХ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ РУХУ ЗРАЗКІВ ГІРСЬКОЇ ПОРОДИ (КЕРНІВ) ПРИ ЦИРКУЛЯЦІЇ НЬЮТОНІВСЬКОЇ РІДИНИ

4.1 Особливості характеру впливу складових перепаду тиску в бурильній колоні на транспортування керну

Необхідність відбору зразків ГП у вигляді її колонки (іншими словами керна) виступає основним методом геологічної розвідки та відповідних досліджень (рис. 4.1) [68]. Колонкове буріння (відрізняється руйнуванням ГП не за всією площею вибою свердловини, а лише за кільцевим її елементом) застосовується в ГП усіх категорій твердості при бурінні розвідувальних і розвідувально-експлуатаційних нафтогазових свердловин, пошуках і розвідці родовищ твердих корисних копалин, геологічному картуванні, гідрогеологічних та інженерно-геологічних дослідженнях ґрунтів [69]. Наступні дослідження отриманого керна дають можливість отримати максимально можливу характеристику ГП.



Рис. 4.1 Типові зразки кернових проб ГП

Кернові зразки ГП зі споруджуваної свердловини витягуються шляхом періодичного підйому БК зі спеціальної конструкції БС на її нижньому кінці – колонковою трубою, що містить усередині керна (трудомісткий та вельми повільний в часі прийом), а також знімними керноприймачами або шляхом безперервного транспортування керна через подвійну БК зворотним потоком ПР в процесі буріння (вважаються прогресивними технологіями) [46].

Через притаманність технології буріння з гідротранспортом керна ознак значного скорочення часу на виконання СПО та істотного підвищення геологічної інформативності, вона потребує свого подальшого раціонального удосконалення і розширення сфери ефективного застосування [45].

До найактуальніших завдань у галузі теорії (та наступної практики) гідротранспорту керна слід віднести такі найважливіші: розробка методики визначення швидкості руху керна та шламу в центральному каналі подвійної БК; дослідження впливу механічної швидкості буріння на показники режиму транспортування керна; розробка методики визначення гідравлічних опорів в окремих елементах подвійної БК; визначення раціональних геометричних розмірів БК.

При бурінні свердловин з безперервним виносом керна висхідним потоком виникає необхідність визначення такої витрати ПР, при якій забезпечувалася б повне очищення вибою від зруйнованої породи і дотримувалися задані умови транспортування керна по внутрішньому каналу подвійної БК. Вирішення вказаного завдання можливе лише при чіткому уявленні про основні закономірності руху твердого тіла погано обтічної форми (яким і є kern) у висхідному потоці ПР в умовах малих зазорів між керном і трубами БК.

Комплекси технічних засобів з гідротранспортом керна призначені та ефективно використовуються для буріння свердловин в породах II - IV категорій за буримістю (це глини, суглинки, слабозцементовані піски, аргіліти, піщано-гравійні відкладення тощо). Буріння по незв'язних ГП здійснюється з максимальними механічними швидкостями, тому необхідно підбирати таку продуктивність БН, яка забезпечувала б відповідне очищення вибою свердловини.

Вважається, що теоретично 90% центрального каналу подвійної БК при бурінні по щільних ГП заповнено керном і лише 10% відповідної кільцевої площі залишається для транспортування шламу, об'єм якого, який утворюється в одиницю часу, майже в чотири, і навіть більше, рази перевищує об'єм колонок керна. В цьому випадку різниця площ каналів для проходження керна і шламу ГП породжує його стиск, напресовування шламу на kern, а це суттєво порушує структуру кернових зразків, тому слід забезпечити таку продуктивність БН, яка зводила б до мінімуму час контакту шламу з керном.

На даний час питання транспортування шламу і керношламової суміші в центральному каналі подвійної БК практично не розглядаються. Присутні лише деякі розрізнені відомості про вплив наявності керна в ньому на величину перепаду тиску в БК (підсумовуючи результати вказаних досліджень, можна констатувати, що перепад тиску на транспортування керна незначний, проте це питання неоднозначне та вимагає подальшого дослідження).

При обертанні подвійної БК, kern, що знаходиться в її центральному каналі, під дією відцентрових сил відкидатиметься на стінку внутрішньої труби, отже, величина перепаду тиску при ексцентричному розташуванні керна буде відрізнятися від такої при транспортуванні керна, який знаходиться по центру. Тому необхідна розробка методики, що дозволяє враховувати зазначені умови.

Подальший розвиток методу буріння з гідротранспортом керна доцільно вести в напрямку розширення областей застосування (наприклад, збільшення граничної глибини буріння) за рахунок удосконалення бурового інструменту та, насамперед, його головного елемента – подвійної БК.

Геометричні розміри подвійної БК визначаються з огляду на необхідність отримання певного діаметру керна і наявності мінімальної ширини кільцевого вибою свердловини, без урахування гідравлічних втрат; тому суттєві їх величини в існуючих конструкціях подвійних БК спостерігаються в кільцевому каналі. Раціональне збільшення глибини буріння можливе на підставі розробки конструкції подвійної БК, що відповідає, крім технологічних параметрів, також мінімуму сумарних гідравлічних втрат в центральному і кільцевому каналах.

РОЗДІЛ 4 *Закономірності руху зразків гірської породи при циркуляції ньютонівської рідини*

Вкажемо тут, що за розглядуваних умов, гранична глибина буріння регламентується максимальним перепадом тиску для використовуваного БН.

Для отримання найменших гідравлічних опорів при прокачуванні ПР в кільцевому і центральному каналах подвійної БК, потрібно прагнути досягти однакової швидкості низхідного та висхідного потоків ПР. Вказане можливо при створенні рівних площ характерних гідравлічних контурів. Зазначимо, що діаметр центрального каналу подвійної БК для буріння з гідротранспортом керна визначається з умов вільного проходження стовпчиків керна ГП через БК. У всіх можливих випадках необхідно прагнути мінімальної різниці діаметрів керна і центрального каналу – це суттєво зменшує габарити колони.

Істотно гальмує широке впровадження методу буріння з гідротранспортом керна в практику буріння відсутність достатньо обґрунтованої методики розробки параметрів названої технології для конкретних геологічних умов [70].

Таблиця 4.1

Параметри режиму буріння за технологією гідротранспорту керна

ГП геологічного розрізу свердловини	Буріння			Ходіння БС	
	Частота обертання, с ⁻¹	Навантаження на вибій, кг	Подача ПР, дм ³ /хв.	Інтервал, м	Висота, м
В'язкі глини та суглинки	5,4	560 - 900	200 - 320	1 - 1,5	1 - 1,5
Піски, супіски	5,4	450 - 900	125	2 - 2,5	0,5
Гравійно-галькові відкладення	2,3 - 3,8	600 - 1000	180 - 260	0,3 - 1,0 (перед нарощуванням здійснювати 3 - 7 ходінь на висоту 3 - 4 м)	0,2 - 0,5 (перед нарощуванням здійснювати 3 - 7 ходінь на висоту 3 - 4 м)
Алевроліти, аргіліти	4,2	700 - 1200	180	0,3 - 0,5	0,1 - 0,5
Пісковики, вапняки	4,2	800 - 1600	180	0,1 - 0,5	0,1 - 0,5
Окременні породи	4,2	1500 - 1800	180	0,05 - 0,1	0,05 - 0,1

Приблизне значення параметрів розглядуваної технології та їхнє поєднання для конкретних умов коригуються виходячи з рівня досягнутих швидкостей і обертальних моментів для подвійної БК, що виникають при бурінні. В табл. 4.1 наведено орієнтовні технологічні параметри процесу буріння з гідротранспортом керна в породах з різними фізико-механічними властивостями, розроблені

РОЗДІЛ 4 Закономірності руху зразків гірської породи при циркуляції ньютонівської рідини

на підставі лабораторних та промислових досліджень. Зазначимо, що для м'яких ГП основним параметром, який характеризує розглядуваний процес буріння, є швидкість подачі, а при бурінні твердих ГП – осьове навантаження.

При бурінні свердловин з гідротранспортом керну в якості ОА, при відповідних характеристиках геологічного розрізу, використовують воду. Як відомо, вода належить до ньютонівських рідин, тобто рідин, що підпорядковуються закону в'язкості Ньютона [36]. Для таких рідин розрізняють два режими течії: ламінарний і турбулентний. При першому режимі течії окремі струмені рідини рухаються паралельно один одному, не переміщуючись. Епюра швидкостей при ламінарному режимі руху являє собою рівнобоку параболу. У центрі труби швидкість максимальна, біля стінок дорівнює нулю. Другий режим руху протікає з активним змішуванням струменів потоку. Перехід від одного режиму руху до іншого і назад здійснюється при певній середній швидкості потоку – критичній. При цьому слід розрізняти верхню і нижню критичну швидкості. Остання відповідає випадку, коли рідина, рухаючись по трубах будь-якої шорсткості, зберігає тільки ламінарний рух без перемішування частинок, тобто коли середня швидкість потоку ньютонівської рідини менше нижньої критичної. Причому стійкою формою течії є – ламінарна. Навпаки, при швидкостях які вище верхньої критичної, можливий тільки один турбулентний рух, як би спокійно не входила рідина в трубу і якими б гладкими не були її стінки. У проміжку між цими двома межами можливі як ламінарний, так і турбулентний режими руху.

Повертаючись до рівняння (2.35), ми знайдемо в ньому складову $\frac{\lambda_{kn} \cdot l_k}{d_2}$, що визначає величину гідравлічних опорів у кільцевому зазорі «кern - БТ».

Безрозмірний коефіцієнт гідравлічного опору λ_{kn} при промиванні ньютонівською рідиною можна розрахувати за формулою Блазіуса [37]:

$$\lambda_{kn} = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{Re_{kn}}}, \quad (4.1)$$

де Re_{kn} – безрозмірний параметр Рейнольдса, який визначає режим течії ньютонівської рідини в кільцевому просторі відповідного каналу:

$$Re_{kn} = \frac{V_{kk} (D_6 - d_k)}{\nu} \quad (4.2)$$

де V_{kk} – швидкість потоку ПР відносно керну ГП в кільцевому зазорі подвійної БК, м/с; D_6 – внутрішній діаметр внутрішніх БТ подвійної БК, м.

Формула (4.1) дає задовільні значення розрахункової величини λ_{kn} для чисел Рейнольдса, що лежать у діапазоні $1 < Re_{kn} < 10^5$.

На рис. 4.2 представлено орієнтовну схему розподілу швидкостей в кільцевому просторі транспортного каналу, утвореного внутрішньою трубою подвійної БК і керном при русі його у висхідному потоці ПР, крім того, на рис. 4.3 зображено розрахункову залежність коефіцієнта гідравлічного опору λ_{kn} від числа Рейнольдса Re_{kn} при граничних значеннях площинно-швидкісного коефіцієнту F , нагадаємо, що останній виступає відношенням площі перерізу потоку ПР в трубі F_0 до міделевої площі стовпчика керна ($F = 0,807; 0,571$).

РОЗДІЛ 4 *Закономірності руху зразків гірської породи при циркуляції ньютонівської рідини*

Для більшої наочності і можливості зручної адекватної оцінки циркуляційних характеристик потоку в табл. 4.2 - 4.8 наведені окремі гідравлічні параметри руху ньютонівської рідини і зразків керну ГП.

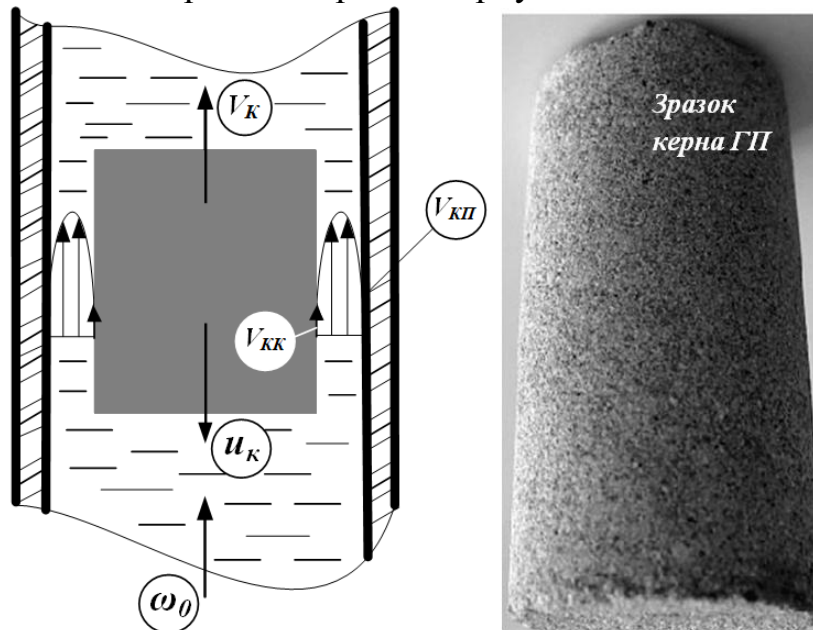


Рис. 4.2. Схема розподілу швидкостей при русі керна в висхідному потоці ПР

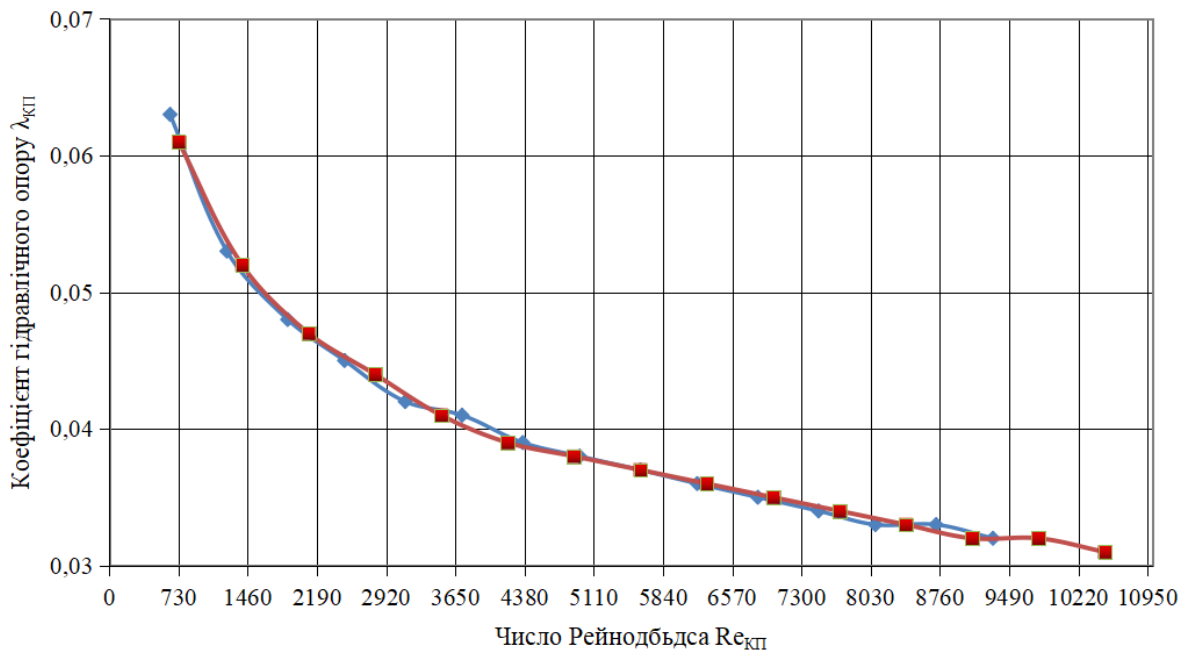


Рис. 4.3. Залежність виду $\lambda_{кп} = f(Re_{кп})$ при $F = 0,807; 0,571$, за умов циркуляції ПР – води (ньютонівська рідина)

Презентовані розрахунки виконані в широкому діапазоні значень відносної швидкості керну u_k , швидкостей потоку в кільцевому каналі щодо труби $V_{кп}$ і швидкостей потоку в кільцевому каналі відносно керну $V_{кк}$.

Значний за змістом обсяг табличної цифрової інформації необхідний для наступного правильного і обґрунтованого судження про конкретні гідравлічні характеристики потоку ньютонівської рідини (відповідної ПР).

Таблиця 4.2

Циркуляційні характеристики руху ньютонівської ПР і зразків керну ГП при відношенні площі перерізу потоку в трубі до міделевої площі керна $F = 0,807$

Відносна швидкість керна ГП u_k , м/с	Швидкість потоку ПР в кільцевому каналі відносно труби $V_{кп}$, м/с	Швидкість потоку ПР в кільцевому каналі БК відносно керна $V_{кк}$, м/с	Число Рейнольдса $Re_{кп}$	Коефіцієнт гідравлічного опору в кільцевому каналі БК відносно керна $\lambda_{кп}$
2,18	2,18	0	0	–
2,15	2,31	0,16	640	0,063
2,12	2,43	0,31	1240	0,053
2,09	2,56	0,47	1880	0,048
2,06	2,68	0,62	2480	0,045
2,03	2,81	0,78	3120	0,042
2,0	2,93	0,93	3720	0,041
1,97	3,06	1,09	4360	0,039
1,94	3,18	1,24	4960	0,038
1,91	3,31	1,4	5600	0,037
1,88	3,43	1,55	6200	0,036
1,85	3,56	1,71	6840	0,035
1,82	3,69	1,87	7480	0,034
1,79	3,81	2,02	8080	0,033
1,76	3,94	2,18	8720	0,033
1,73	4,06	2,33	9320	0,032

Таблиця 4.3

Циркуляційні характеристики руху ньютонівської ПР і зразків керну ГП при відношенні площі перерізу потоку в трубі до міделевої площі керна $F = 0,764$

Відносна швидкість керна ГП u_k , м/с	Швидкість потоку ПР в кільцевому каналі відносно труби $V_{кп}$, м/с	Швидкість потоку ПР в кільцевому каналі БК відносно керна $V_{кк}$, м/с	Число Рейнольдса $Re_{кп}$	Коефіцієнт гідравлічного опору в кільцевому каналі БК відносно керна $\lambda_{кп}$
2,18	2,18	0	0	–
2,15	2,28	0,13	650	0,063
2,12	2,37	0,25	1250	0,053
2,09	2,47	0,38	1900	0,048
2,06	2,57	0,51	2550	0,045
2,03	2,67	0,64	3200	0,042
2,0	2,76	0,76	3800	0,040
1,97	2,86	0,89	4450	0,039
1,94	2,96	1,02	5100	0,037
1,91	3,05	1,14	5700	0,036
1,88	3,15	1,27	6350	0,035
1,85	3,25	1,4	7000	0,035
1,82	3,35	1,53	7650	0,034
1,79	3,44	1,65	8250	0,033
1,76	3,54	1,78	8900	0,033
1,73	3,64	1,91	9550	0,032

Таблиця 4.4

Циркуляційні характеристики руху ньютонівської ПР і зразків керну ГП при відношенні площі перерізу потоку в трубі до міделевої площі керна $F = 0,729$

Відносна швидкість керна ГП u_k , м/с	Швидкість потоку ПР в кільцевому каналі відносно труби $V_{кп}$, м/с	Швидкість потоку ПР в кільцевому каналі БК відносно керна $V_{кк}$, м/с	Число Рейнольдса $Re_{кп}$	Коефіцієнт гідравлічного опору в кільцевому каналі БК відносно керна $\lambda_{кп}$
2,18	2,18	0	0	–
2,15	2,26	0,11	660	0,062
2,12	2,34	0,22	1320	0,052
2,09	2,42	0,33	1980	0,047
2,06	2,5	0,44	2640	0,044
2,03	2,58	0,55	3300	0,042
2,0	2,66	0,66	3960	0,04
1,97	2,74	0,77	4620	0,038
1,94	2,83	0,89	5340	0,037
1,91	2,91	1,0	6000	0,036
1,88	2,99	1,11	6660	0,035
1,85	3,07	1,22	7320	0,034
1,82	3,15	1,33	7980	0,033
1,79	3,21	1,42	8520	0,033
1,76	3,31	1,55	9300	0,032
1,73	3,39	1,66	9960	0,032

Таблиця 4.5

Циркуляційні характеристики руху ньютонівської ПР і зразків керну ГП при відношенні площі перерізу потоку в трубі до міделевої площі керна $F = 0,686$

Відносна швидкість керна ГП u_k , м/с	Швидкість потоку ПР в кільцевому каналі відносно труби $V_{кп}$, м/с	Швидкість потоку ПР в кільцевому каналі БК відносно керна $V_{кк}$, м/с	Число Рейнольдса $Re_{кп}$	Коефіцієнт гідравлічного опору в кільцевому каналі БК відносно керна $\lambda_{кп}$
2,18	2,18	0	0	–
2,15	2,25	0,1	700	0,062
2,12	2,31	0,19	1330	0,052
2,09	2,38	0,29	2030	0,047
2,06	2,44	0,38	2660	0,044
2,03	2,51	0,48	3360	0,042
2,0	2,57	0,57	3990	0,04
1,97	2,64	0,67	4690	0,038
1,94	2,7	0,76	5320	0,037
1,91	2,77	0,86	6020	0,036
1,88	2,84	0,96	6720	0,035
1,85	2,9	1,05	7350	0,034
1,82	2,97	1,15	8050	0,033
1,79	3,03	1,24	8680	0,033
1,76	3,1	1,34	9380	0,032
1,73	3,16	1,43	10010	0,032

Таблиця 4.6

Циркуляційні характеристики руху ньютонівської ПР і зразків керну ГП при відношенні площі перерізу потоку в трубі до міделевої площі керна $F = 0,65$

Відносна швидкість керна ГП u_k , м/с	Швидкість потоку ПР в кільцевому каналі відносно труби $V_{кп}$, м/с	Швидкість потоку ПР в кільцевому каналі БК відносно керна $V_{кк}$, м/с	Число Рейнольдса $Re_{кп}$	Коефіцієнт гідравлічного опору в кільцевому каналі БК відносно керна $\lambda_{кп}$
2,18	2,18	0	0	–
2,15	2,24	0,09	710	0,061
2,12	2,29	0,17	1350	0,052
2,09	2,35	0,26	2070	0,047
2,06	2,4	0,34	2720	0,044
2,03	2,46	0,43	3420	0,041
2,0	2,51	0,51	4080	0,04
1,97	2,57	0,6	4770	0,038
1,94	2,63	0,69	5490	0,037
1,91	2,68	0,77	6160	0,036
1,88	2,74	0,86	6840	0,035
1,85	2,79	0,94	7520	0,034
1,82	2,85	1,03	8240	0,033
1,79	2,9	1,11	8880	0,033
1,76	2,96	1,2	9600	0,032
1,73	3,02	1,29	10320	0,031

Таблиця 4.7

Циркуляційні характеристики руху ньютонівської ПР і зразків керну ГП при відношенні площі перерізу потоку в трубі до міделевої площі керна $F = 0,607$

Відносна швидкість керна ГП u_k , м/с	Швидкість потоку ПР в кільцевому каналі відносно труби $V_{кп}$, м/с	Швидкість потоку ПР в кільцевому каналі БК відносно керна $V_{кк}$, м/с	Число Рейнольдса $Re_{кп}$	Коефіцієнт гідравлічного опору в кільцевому каналі БК відносно керна $\lambda_{кп}$
2,18	2,18	0	0	–
2,15	2,23	0,08	720	0,061
2,12	2,27	0,15	1360	0,052
2,09	2,32	0,23	2080	0,047
2,06	2,37	0,31	2790	0,044
2,03	2,41	0,38	3440	0,041
2,0	2,46	0,46	4140	0,04
1,97	2,5	0,53	4800	0,038
1,94	2,55	0,61	5520	0,037
1,91	2,6	0,69	6210	0,036
1,88	2,64	0,76	6880	0,035
1,85	2,69	0,84	7560	0,034
1,82	2,74	0,92	8280	0,033
1,79	2,78	0,99	8910	0,033
1,76	2,83	1,07	9630	0,032
1,73	2,88	1,15	10350	0,031

Таблиця 4.8

Циркуляційні характеристики руху ньютонівської ПР і зразків керну ГП при відношенні площі перерізу потоку в трубі до міделевої площі керна $F = 0,571$

Відносна швидкість керна ГП u_k , м/с	Швидкість потоку ПР в кільцевому каналі відносно труби $V_{кп}$, м/с	Швидкість потоку ПР в кільцевому каналі БК відносно керна $V_{кк}$, м/с	Число Рейнольдса $Re_{кп}$	Коефіцієнт гідравлічного опору в кільцевому каналі БК відносно керна $\lambda_{кп}$
2,18	2,18	0	0	—
2,15	2,22	0,07	730	0,061
2,12	2,26	0,14	1400	0,052
2,09	2,3	0,21	2100	0,047
2,06	2,34	0,28	2800	0,044
2,03	2,38	0,35	3500	0,041
2,0	2,42	0,42	4200	0,039
1,97	2,46	0,49	4900	0,038
1,94	2,5	0,56	5600	0,037
1,91	2,54	0,63	6300	0,036
1,88	2,58	0,7	7000	0,035
1,85	2,62	0,77	7700	0,034
1,82	2,66	0,84	8400	0,033
1,79	2,7	0,91	9100	0,032
1,76	2,74	0,96	9800	0,032
1,73	2,78	1,05	10500	0,031

Аналіз даних рис. 4.2 та табл. 4.2 - 4.8 показує: значення і варіація чисел коефіцієнту опору $\lambda_{кп}$ зазору «кern - труба» при зміні F незначні, і при великих числах Рейнольдса величина його стає практично постійною.

У табл. 4.9 наведено значення відносної швидкості керну u_k ГП з урахуванням різних впливових параметрів. Обрахування виконані за умови, що $\rho_k = 2500 \text{ кг/м}^3$ (така щільність характерна для більшості зразків тих ГП, що складають потужні товщі осадових і метаморфічних порід).

Таблиця 4.9

Величини відносних швидкостей керна u_k з урахуванням різних параметрів, що складають сумарний перепад тиску на транспортування зразків ГП

Величина зазору F	Параметр, який враховується в рівнянні визначення швидкості керна u_k			
	P_l	$P_l + P_v$	$P_l + P_v + P_k$	$P_l + P_v + P_k + P_{вх}$
0,807	0,22	0,20	0,20	0,19
0,764	0,31	0,28	0,28	0,27
0,729	0,38	0,35	0,34	0,33
0,686	0,47	0,44	0,43	0,41
0,65	0,55	0,54	0,49	0,47
0,607	0,64	0,59	0,57	0,56
0,571	0,71	0,66	0,64	0,62

Аналізуючи дані табл. 4.9, можна зробити висновок, що істотний вплив на відносну швидкість керну ГП чинять тільки сили лобового опору P_l і гідравлічного опору P_v на виході потоку з кільцевого зазору «кern - труба».

Отже, рівняння (2.35) можна представити у наступному вигляді:

$$u_k = \sqrt{\frac{\rho_k - \rho}{\rho} - 2gl_k \frac{(1-F)^2}{C_x K_1^2 \left(\frac{1-F}{1-\tau F}\right)^2 + F^2}} \quad (4.3)$$

Зазначена формула буде справедлива, коли довжина керну ГП не перевищує 0,2 м, що саме і забезпечується конструкцією кернолому.

4.2 Визначення залежності швидкості руху керну від геометричних розмірів транспортного каналу та його фізико-геометричних параметрів

При бурінні свердловин з подвійною БК, центральним каналом транспортується kern різної щільності і довжини. Особливістю застосування технічних засобів із гідротранспортом керну, серед іншого, виступає ефект збільшення лінійного виходу зразків ГП в 5 - 6 разів, що характерно при бурінні по глинах та алевролітах. Дослідження впливу зазначених факторів на відносну швидкість керну u_k дозволить правильно підбирати режим промивання свердловини [45].

У формулу визначення швидкості u_k , при циркуляції ньютонівської рідини (2.35, 4.3), входить складова ρ_k – щільність керна ГП; характер впливу вказаного параметру на швидкість u_k показаний в табл. 4.10.

Таблиця 4.10

Розрахункові значення відносної швидкості керну u_k , залежно від його ρ_k

Зазор F	Щільність зразків керна ГП ρ_k , кг/м ³								
	1700	1900	2100	2300	2500	2700	2900	3100	3300
0,807	0,14	0,16	0,17	0,19	0,20	0,21	0,23	0,24	0,25
0,764	0,19	0,22	0,24	0,26	0,28	0,30	0,32	0,34	0,35
0,729	0,24	0,27	0,30	0,33	0,35	0,37	0,40	0,42	0,43
0,686	0,30	0,34	0,37	0,41	0,44	0,47	0,49	0,52	0,54
0,65	0,39	0,39	0,43	0,47	0,51	0,54	0,57	0,60	0,63
0,607	0,41	0,46	0,51	0,55	0,59	0,63	0,67	0,70	0,73
0,571	0,45	0,51	0,57	0,62	0,66	0,71	0,75	0,79	0,82

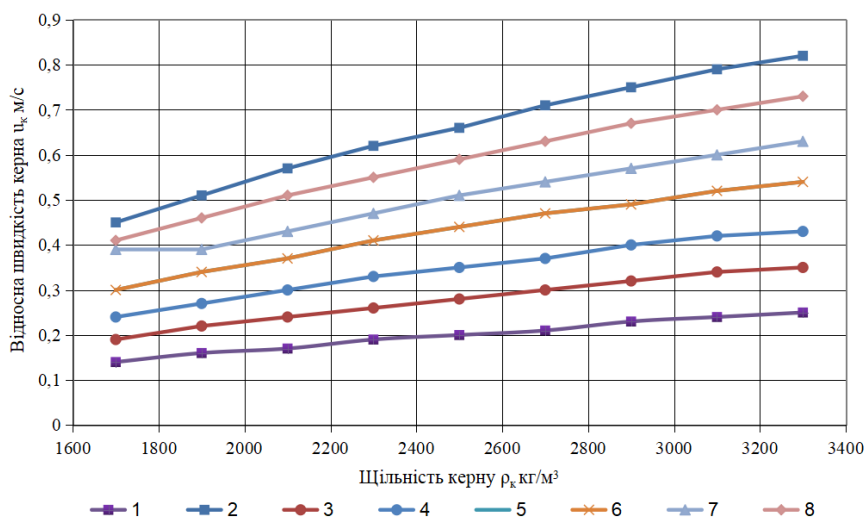


Рис. 4.4. Залежність $u_k = f(\rho_k)$ при $F = 0,807 \div 0,571$, очисний агент – вода

РОЗДІЛ 4 *Закономірності руху зразків гірської породи при циркуляції ньютонівської рідини*

Аналіз даних табл. 4.9 дозволяє зробити висновок, що швидкість керна u_k зростає як зі збільшенням його щільності при постійному F , так і при постійній ρ_k зі збільшенням зазору «кern - труба», причому інтенсивність наростання u_k більшою мірою визначається саме зі збільшенням зазору «кern - труба».

Наочна графічна інтерпретація впливу щільності зразків керна ρ_k на його відносну швидкість u_k представлена на рис. 4.4.

Таблиця 4.11

Відносна швидкість керна u_k при промиванні свердловини водою

F	Довжина зразків керна ГП l_k , м										
	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2
0,807	0,20	0,25	0,28	0,32	0,35	0,38	0,40	0,43	0,45	0,47	0,49
	0,20	0,24	0,27	0,30	0,33	0,35	0,38	0,40	0,41	0,43	0,45
0,764	0,28	0,35	0,40	0,45	0,49	0,53	0,57	0,60	0,64	0,67	0,70
	0,28	0,34	0,38	0,42	0,46	0,49	0,52	0,55	0,57	0,59	0,61
0,729	0,35	0,43	0,50	0,55	0,61	0,66	0,70	0,74	0,78	0,82	0,86
	0,34	0,41	0,47	0,52	0,56	0,60	0,64	0,67	0,70	0,72	0,75
0,686	0,44	0,54	0,62	0,69	0,76	0,82	0,88	0,93	0,98	1,03	1,07
	0,43	0,51	0,59	0,65	0,70	0,75	0,80	0,83	0,86	0,89	0,92
0,65	0,51	0,62	0,71	0,80	0,88	0,95	1,01	1,07	1,13	1,19	1,24
	0,49	0,59	0,68	0,74	0,81	0,86	0,91	0,95	0,99	1,03	1,06
0,607	0,59	0,73	0,84	0,94	1,03	1,11	1,18	1,26	1,32	1,39	1,45
	0,57	0,69	0,79	0,87	0,94	1,0	1,06	1,11	1,15	1,19	1,23
0,571	0,66	0,81	0,94	1,05	1,15	1,24	1,33	1,41	1,48	1,56	1,62
	0,64	0,78	0,88	0,97	1,05	1,12	1,18	1,24	1,29	1,33	1,38

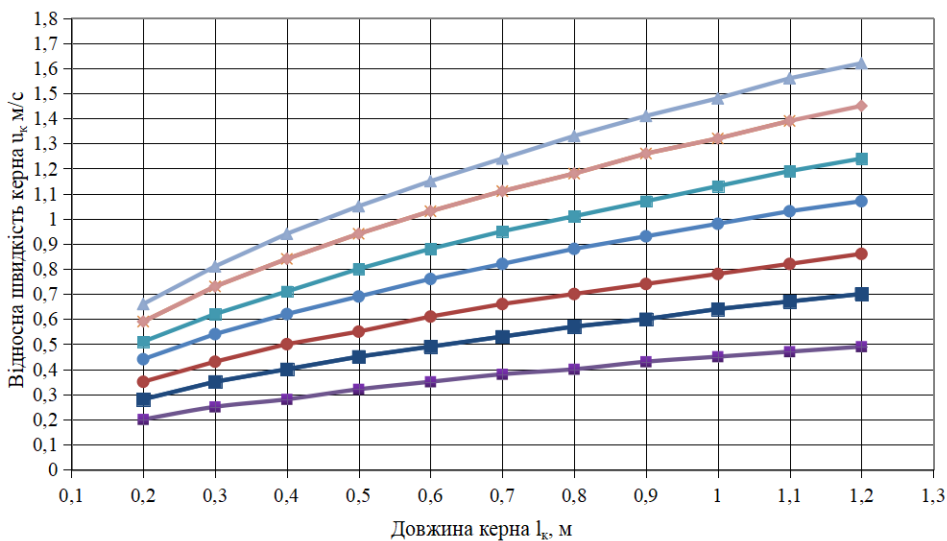


Рис. 4.5. Залежність виду $u_k = f(l_k)$ при $F = 0,807 \div 0,571$, з урахуванням сил P_d і P_{σ} , ПР – вода (ньютонівська рідина)

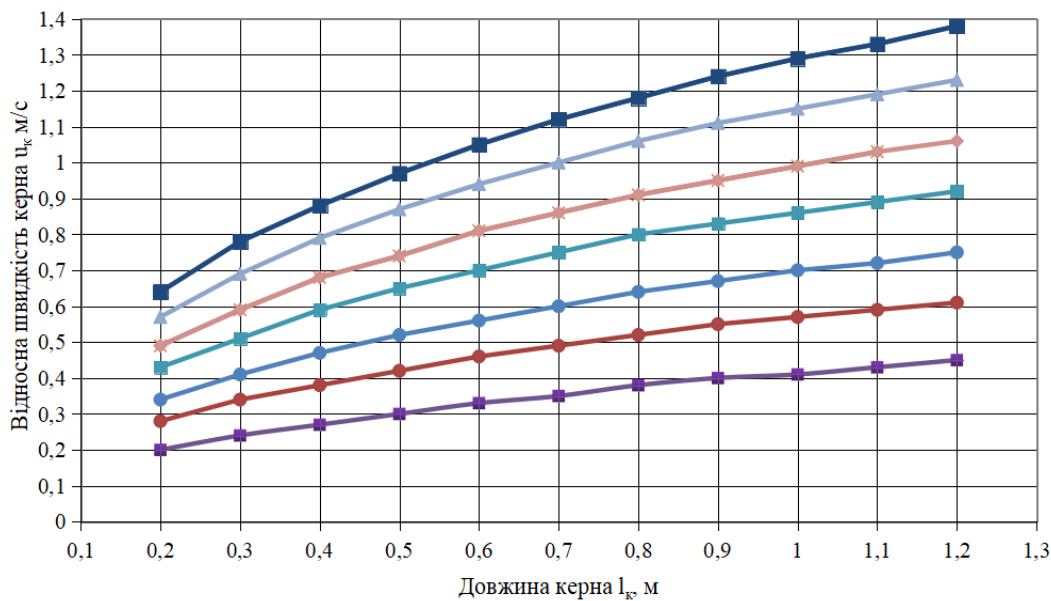


Рис. 4.6. Залежність виду $u_k = f(l_k)$ при $F = 0,807 \div 0,571$, з урахуванням P_l, P_g і $P_k, ПР$ – вода (ньютонівська рідина)

У табл. 4.11 і на рис. 4.5 - 4.6 наведені результати розрахунків відносної швидкості ядру u_k при його змінній довжині від 0,2 до 1,2 м; обчислення u_k (з урахуванням впливу різноманітних складових перепаду тиску на транспортування ядру) виконано з умови застосування в якості ПР води [31].

За результатами детального вивчення представлених даних можна зробити висновок, що зі зростанням зазору F і власне довжини ядра l_k відносна швидкість u_k останнього збільшується; у той же час найбільший вплив на зростання u_k чинить саме параметр F (площинно-швидкісний коефіцієнт).

Як вже зазначалося, формула (4.3) для розрахунку відносної швидкості ядру u_k справедлива, коли довжина транспортованого зразка ГП не перевищує 0,2 м. У результаті проведених розрахунків були отримані уточнені формули для визначення відносної швидкості ядру u_k за умов, коли довжина отримуваних зразків породи у вигляді стовпчиків ГП перевищує 0,2 м.

$$u_k = m \cdot \sqrt{\frac{\rho_k - \rho}{\rho} - 2gl_k \frac{(1-F)^2}{C_x K_1^2 \left(\frac{1-F}{1-\tau \cdot F}\right)^2 + F^2}}, \quad (4.4)$$

де m – поправочний коефіцієнт, який залежить від довжини транспортованого ядру ГП, значення якого наведені в таблиці 4.12.

Таблиця 4.12

Поправочний коефіцієнт m

Тип очисного агента (ПР)	Довжина зразка ядра l_k , м					
	0,2 - 0,4	0,4 - 0,7	0,7 - 0,9	0,9 - 1,0	1,0 - 1,1	1,1 - 1,2
Вода	0,96	0,92	0,9	0,88	0,87	0,86

Зазначимо, що запропонований коефіцієнт m фізично характеризує внесок сили P_k у значення відносної швидкості ядру u_k (табл. 4.13).

Таблиця 4.13

Відсотковий внесок сили P_k у відносну швидкість керна u_k

F	Довжина зразків керна l_k , м										
	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2
0,807	0	4	4	6	6	8	5	7	9	9	8
0,764	0	3	5	7	6	8	9	8	11	12	13
0,729	3	5	6	6	8	9	9	10	10	12	13
0,686	2	6	5	6	8	9	9	11	12	14	14
0,65	4	5	4	8	8	10	10	11	12	13	15
0,607	3	6	6	7	9	10	10	12	13	14	15
0,571	3	4	6	8	9	10	11	12	13	15	15

Таким чином, у результаті розрахунків отримано формулу, що визначає швидкість u_k для зразків ГП, довжина яких лежить в інтервалі від 0,2 до 1,2 м.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 4

1. Вивчено характер впливу складових перепаду тиску (P_l , P_k , P_v , P_{ex}) на швидкість транспортування керну при промиванні свердловин водою.

2. Показана залежність безрозмірного коефіцієнта гідравлічного опору λ_{kn} в кільцевому просторі (відносно керну) від величини числа Рейнольдса (Re_{kn}), що визначає режим руху рідини, в даному випадку, в зазорі «кern - труба».

3. Розрахунками доведено, що λ_{kn} є функцією декількох змінних, визначальними з яких є F (площинно-швидкісний коефіцієнт) і Re_{kn} . Причому, Re_{kn} тут виступає як результат швидкісних співвідношень в парі «кern - потік промивальної рідини». Крім того, значних змін величина λ_{kn} зазнає тільки при варіюванні швидкості течії рідини в кільцевому зазорі між керном і трубою, збільшення ж цього кільцевого зазору вплив на значення λ_{kn} практично не чинить.

4. Визначальними параметрами у величині відносної швидкості керна u_k є сили: P_l – сила лобового опору і P_v – сила гідравлічного опору на виході потоку з кільцевого зазору «кern - труба» вказане дозволило отримати уточнену формулу для u_k , яка відрізняється простотою і можливістю отримання швидкісних характеристик зразків породи без прийняття певних значних допущень.

5. Вивчено вплив геометричних розмірів кернової магістралі, щільності і довжини зразків породи на швидкість руху керна u_k . Розрахунками показано, що відносна швидкість керна зростає як зі збільшенням щільності керна при постійному F , так і при постійній щільності зі збільшенням зазору «кern - труба», причому інтенсивніше швидкість керна зростає зі збільшенням зазору між кермом і внутрішньою трубою. Отже, для забезпечення безперебійного транспортування зразків породи значної щільності необхідно прагнути до мінімальної величини кільцевого зазору між керном і трубою.

6. Оцінено вплив на u_k довжини зразків гірської породи. Доведено, що зростання F і l_k викликає збільшення u_k , проте найбільший вплив на величину амплітуди u_k чинить саме параметр F . Саме тому ефективне транспортування кернового матеріалу можливе тільки при його певній довжині ($l_k = const$).

РОЗДІЛ 5. ВІДМІТНІ ОЗНАКИ ОСОБЛИВОСТЕЙ РУХУ КЕРНІВ ПРИ ЦИРКУЛЯЦІЇ В'ЯЗКО-ПЛАСТИЧНОЇ ПРОМИВАЛЬНОЇ РІДИНИ

5.1 Аналіз складових процесу транспортування зразків породи у вигляді керну при циркуляції в'язко-пластичної промивальної рідини

Для подальшого коректного розуміння сутності пропонуваного до розгляду аналітично-практичного матеріалу проведених досліджень, зазначимо наступне. Особливий клас циркуляційних середовищ, а саме в'язко-пластичні рідини (ВІР) є, узагальнено, проміжною ланкою між рідкими і твердими тілами і відповідним чином поєднують у собі класичні властивості як в'язкої ньютонівської рідини, так і твердого пластичного тіла [29]. До вказаних систем, до прикладу, відносяться різного роду суспензії та колоїдальні розчини, які складаються з твердої та рідкої фаз; це типові глинисті та цементні розчини (застосовувані у буровій справі), нафти із значним вмістом парафіну, бітуми тощо [71].

ІР для буріння з гідротранспортом керна в ускладнених умовах повинні мати високою виносною здатністю при порівняно невеликій в'язкості, низьку фільтраційну витрату та прийнятні кольматуючі властивості; крім того, із підвищенням ступеню складності геолого-технічних умов, появи в розрізі нестійких ГІ та збільшенні глибин, з'являється необхідність використання спеціальних ІР до яких, насамперед, належать глинисті розчини (неньютонівські рідини).

Характер руху в'язко-пластичних ІР (на прикладі бурових розчинів) має ряд специфічних особливостей. Завдяки наявності структури, рух таких рідин стане можливим тільки тоді, коли величина прикладеного зовнішнього тиску стане більше деякого певного значення для даної рідини [21].

Оскільки, в контексті необхідності розгляду режиму руху ВІР в кільцевому просторі між керном та внутрішньою трубою подвійної БК, нас цікавлять закономірності відповідних циркуляційних характеристик, залучимо до розгляду узагальнений параметр Рейнольдса $Re_{кн}^*$, визначуваний за формулою

$$Re_{кн}^* = \frac{V_{кк} \cdot (D_B - d_{к})}{\eta + \tau_0 \cdot \frac{D_B - d_{к}}{6V_{кк}}}, \quad (5.1)$$

де η – структурна або пластична в'язкість застосовуваної ВІР, Па·с; τ_0 – гранична динамічна напруга зсуву вказаної рідини, Па.

Безрозмірний коефіцієнт гідравлічного опору $\lambda_{кн}^*$ при промиванні свердловин ВІР можна розраховувати за формулою Соловйова:

$$\lambda_{кн}^* = \frac{14,6}{(Re_{кн}^*)^{0,9}}. \quad (5.2)$$

На рис. 5.1 показана залежність коефіцієнта гідравлічного опору $\lambda_{кн}^*$ від числа Рейнольдса $Re_{кн}^*$ при граничних зазорах F .

Нами встановлено наступне: характер впливу режиму руху ІР, інакше кажучи, $Re_{кн}^*$ на величину коефіцієнта $\lambda_{кн}^*$ аналогічний такому при промиванні свердловин ньютонівською рідиною (див. розділ 4). Відповідно до сказаного, на рис. 5.1 показано, що значення $\lambda_{кн}^*$ збільшується зі зростанням зазору «керн -

труба», а при великих числах Рейнольдса розглядуваний коефіцієнт стає практично незначним, тобто, величина $\lambda_{кп}^*$ значна тільки при малих числах $Re_{кп}^*$.

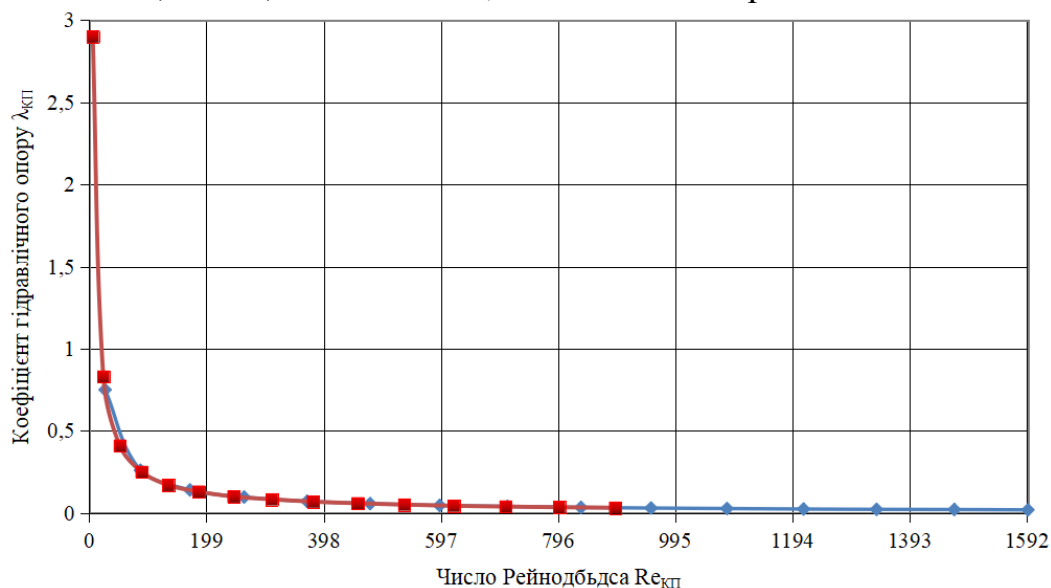


Рис.5.1. Залежність виду $\lambda_{кп}^* = f(Re_{кп}^*)$ при $F = 0,807; 0,571$, очисний агент – глинистий розчин (в'язко-пластична рідина)

Зазначимо ще деякі особливості руху ВПР. Для неї можливі такі режими течії: структурний, ламінарний і турбулентний. Структурний режим течії ВПР передбачає наявність вздовж меж потоку суцільного ламінарного шару рідини, а у його центральній частині спостерігається наявність ядра течії, де рідина рухається, зберігаючи свою структуру, тобто, як тверде тіло [13].

Таблиця 5.1

Циркуляційні характеристики руху в'язко-пластичної ПР і зразків керна при відношенні площі перерізу потоку в трубі до міделевої площі керна $F = 0,807$

Відносна швидкість керна ГП u_k , м/с	Швидкість потоку ПР в кільцевому каналі відносно труби $V_{кп}$, м/с	Швидкість потоку ПР в кільцевому каналі БК відносно керна $V_{кк}$, м/с	Число Рейнольдса $Re_{кп}^*$	Коефіцієнт гідравлічного опору в кільцевому каналі БК відносно керна $\lambda_{кп}^*$
2,18	2,18	0	0	–
2,15	2,31	0,16	27	0,75
2,12	2,43	0,31	87	0,26
2,09	2,56	0,47	171	0,14
2,06	2,68	0,62	263	0,097
2,03	2,81	0,78	370	0,071
2,0	2,93	0,93	477	0,057
1,97	3,06	1,09	595	0,046
1,94	3,18	1,24	710	0,04
1,91	3,31	1,4	835	0,034
1,88	3,43	1,55	954	0,03
1,85	3,56	1,71	1083	0,027
1,82	3,69	1,87	1213	0,024
1,79	3,81	2,02	1337	0,022
1,76	3,94	2,18	1469	0,021
1,73	4,06	2,33	1594	0,019

Таблиця 5.2

Циркуляційні характеристики руху в'язко-пластичної ПР і зразків керна при відношенні площі перерізу потоку в трубі до міделевої площі керна $F = 0,764$

Відносна швидкість керна ГП u_k , м/с	Швидкість потоку ПР в кільцевому каналі відносно труби $V_{кп}$, м/с	Швидкість потоку ПР в кільцевому каналі БК відносно керна $V_{кк}$, м/с	Число Рейнольдса $Re_{кп}^*$	Коефіцієнт гідравлічного опору в кільцевому каналі БК відносно керна $\lambda_{кп}^*$
2,18	2,18	0	0	—
2,15	2,28	0,13	19	1,03
2,12	2,37	0,25	63	0,35
2,09	2,47	0,38	131	0,18
2,06	2,57	0,51	213	0,12
2,03	2,67	0,64	306	0,084
2,0	2,76	0,76	336	0,078
1,97	2,86	0,89	506	0,054
1,94	2,96	1,02	618	0,045
1,91	3,05	1,14	724	0,039
1,88	3,15	1,27	844	0,034
1,85	3,25	1,4	965	0,03
1,82	3,35	1,53	1090	0,027
1,79	3,44	1,65	1170	0,025
1,76	3,54	1,78	1334	0,022
1,73	3,64	1,91	1463	0,021

Таблиця 5.3

Циркуляційні характеристики руху в'язко-пластичної ПР і зразків керна при відношенні площі перерізу потоку в трубі до міделевої площі керна $F = 0,729$

Відносна швидкість керна ГП u_k , м/с	Швидкість потоку ПР в кільцевому каналі відносно труби $V_{кп}$, м/с	Швидкість потоку ПР в кільцевому каналі БК відносно керна $V_{кк}$, м/с	Число Рейнольдса $Re_{кп}^*$	Коефіцієнт гідравлічного опору в кільцевому каналі БК відносно керна $\lambda_{кп}^*$
2,18	2,18	0	0	—
2,15	2,26	0,11	14	1,33
2,12	2,34	0,22	52	0,42
2,09	2,42	0,33	108	0,21
2,06	2,5	0,44	177	0,14
2,03	2,58	0,55	258	0,1
2,0	2,66	0,66	346	0,076
1,97	2,74	0,77	442	0,061
1,94	2,83	0,89	511	0,053
1,91	2,91	1,0	691	0,041
1,88	2,99	1,11	771	0,0037
1,85	3,07	1,22	885	0,033
1,82	3,15	1,33	1002	0,029
1,79	3,21	1,42	1100	0,027
1,76	3,31	1,55	1244	0,024
1,73	3,39	1,66	1367	0,022

Таблиця 5.4

Циркуляційні характеристики руху в'язко-пластичної ПР і зразків керна при відношенні площі перерізу потоку в трубі до міделевої площі керна $F = 0,686$

Відносна швидкість керна ГП u_k , м/с	Швидкість потоку ПР в кільцевому каналі відносно труби $V_{кп}$, м/с	Швидкість потоку ПР в кільцевому каналі БК відносно керна $V_{кк}$, м/с	Число Рейнольдса $Re_{кп}^*$	Коефіцієнт гідравлічного опору в кільцевому каналі БК відносно керна $\lambda_{кп}^*$
2,18	2,18	0	0	—
2,15	2,25	0,1	12	1,46
2,12	2,31	0,19	41	0,5
2,09	2,38	0,29	89	0,26
2,06	2,44	0,38	144	0,17
2,03	2,51	0,48	215	0,12
2,0	2,57	0,57	288	0,089
1,97	2,64	0,67	376	0,07
1,94	2,7	0,76	462	0,058
1,91	2,77	0,86	562	0,049
1,88	2,84	0,96	667	0,042
1,85	2,9	1,05	766	0,037
1,82	2,97	1,15	879	0,033
1,79	3,03	1,24	984	0,03
1,76	3,1	1,34	1103	0,027
1,73	3,16	1,43	1213	0,024

Таблиця 5.5

Циркуляційні характеристики руху в'язко-пластичної ПР і зразків керна при відношенні площі перерізу потоку в трубі до міделевої площі керна $F = 0,65$

Відносна швидкість керна ГП u_k , м/с	Швидкість потоку ПР в кільцевому каналі відносно труби $V_{кп}$, м/с	Швидкість потоку ПР в кільцевому каналі БК відносно керна $V_{кк}$, м/с	Число Рейнольдса $Re_{кп}^*$	Коефіцієнт гідравлічного опору в кільцевому каналі БК відносно керна $\lambda_{кп}^*$
2,18	2,18	0	0	—
2,15	2,24	0,09	10	1,83
2,12	2,29	0,17	34	0,61
2,09	2,35	0,26	75	0,3
2,06	2,4	0,34	122	0,19
2,03	2,46	0,43	185	0,13
2,0	2,51	0,51	248	0,1
1,97	2,57	0,6	328	0,079
1,94	2,63	0,69	414	0,064
1,91	2,68	0,77	496	0,055
1,88	2,74	0,86	593	0,047
1,85	2,79	0,94	684	0,041
1,82	2,85	1,03	790	0,036
1,79	2,9	1,11	888	0,032
1,76	2,96	1,2	1000	0,029
1,73	3,02	1,29	1116	0,026

Таблиця 5.6

Циркуляційні характеристики руху в'язко-пластичної ПР і зразків керна при відношенні площі перерізу потоку в трубі до міделевої площі керна $F = 0,607$

Відносна швидкість керна ГП u_k , м/с	Швидкість потоку ПР в кільцевому каналі відносно труби $V_{кп}$, м/с	Швидкість потоку ПР в кільцевому каналі БК відносно керна $V_{кк}$, м/с	Число Рейнольдса $Re_{кп}^*$	Коефіцієнт гідравлічного опору в кільцевому каналі БК відносно керна $\lambda_{кп}^*$
2,18	2,18	0	0	—
2,15	2,23	0,08	8	2,09
2,12	2,27	0,15	27	0,73
2,09	2,32	0,23	61	0,36
2,06	2,37	0,31	105	0,22
2,03	2,41	0,38	152	0,16
2,0	2,46	0,46	214	0,12
1,97	2,5	0,53	274	0,093
1,94	2,55	0,61	349	0,075
1,91	2,6	0,69	430	0,062
1,88	2,64	0,76	506	0,054
1,85	2,69	0,84	597	0,046
1,82	2,74	0,92	693	0,04
1,79	2,78	0,99	779	0,036
1,76	2,83	1,07	888	0,033
1,73	2,88	1,15	988	0,029

Таблиця 5.7

Циркуляційні характеристики руху в'язко-пластичної ПР і зразків керна при відношенні площі перерізу потоку в трубі до міделевої площі керна $F = 0,571$

Відносна швидкість керна ГП u_k , м/с	Швидкість потоку ПР в кільцевому каналі відносно труби $V_{кп}$, м/с	Швидкість потоку ПР в кільцевому каналі БК відносно керна $V_{кк}$, м/с	Число Рейнольдса $Re_{кп}^*$	Коефіцієнт гідравлічного опору в кільцевому каналі БК відносно керна $\lambda_{кп}^*$
2,18	2,18	0	0	—
2,15	2,22	0,07	6	0,061
2,12	2,26	0,14	24	0,052
2,09	2,3	0,21	52	0,047
2,06	2,34	0,28	89	0,044
2,03	2,38	0,35	134	0,041
2,0	2,42	0,42	186	0,039
1,97	2,46	0,49	245	0,038
1,94	2,5	0,56	310	0,037
1,91	2,54	0,63	380	0,036
1,88	2,58	0,7	456	0,035
1,85	2,62	0,77	535	0,034
1,82	2,66	0,84	619	0,033
1,79	2,7	0,91	707	0,032
1,76	2,74	0,96	798	0,032
1,73	2,78	1,05	893	0,031

Як уже зазначалося в попередньому розділі, значний обсяг табличної інформації, представлений тут, необхідний для правильного і обґрунтованого судження про конкретні гідравлічні характеристики потоку ВПР.

Результати аналітичного розрахунку відносної швидкості керна ГП з урахуванням різних параметрів, що входять у формулу (2.35), наведені в табл. 5.8.

Таблиця 5.8

Відносні швидкості керна u_k з урахуванням різних параметрів, визначаючих перепад тиску на транспортування зразків породи ГП в'язко-пластичною рідиною

Величина зазору F	Параметр, який враховується в рівнянні визначення швидкості керна u_k			
	P_l	$P_l + P_v$	$P_l + P_v + P_k$	$P_l + P_v + P_k + P_{ex}$
0,807	0,13	0,13	0,13	0,12
0,764	0,19	0,18	0,18	0,17
0,729	0,23	0,22	0,22	0,21
0,686	0,28	0,27	0,27	0,26
0,65	0,33	0,32	0,31	0,31
0,607	0,38	0,37	0,36	0,36
0,571	0,42	0,41	0,40	0,40

Дані, наведені у табл. 5.8, свідчать про те, що визначальним фактором величини відносної швидкості керна u_k є сила лобового опору; в зв'язку зі вказаним, рівняння (2.35) можна записати в наступному вигляді:

$$u_k = \sqrt{\frac{2 \lg(\rho_k - \rho)(1 - \tau F)^2}{\rho C_x K_1^2}} \quad (5.3)$$

Приведена формула може бути коректно застосована, коли довжина керну ГП не перевищує 0,2 м, що забезпечується конструкцією кернолому.

5.2 Характер впливу геометричних розмірів транспортного каналу подвійної бурильної колони, лінійних та фізико-механічних параметрів керна на швидкість його руху

Нагадаємо, що основні види бурових геологорозвідувальних робіт з метою пошуку та розвідки багатьох видів корисних копалин, супроводжуються спорудженням свердловин у розрізах, складених пухкими ГП осадового походження [72]. Застосування у вказаних умовах традиційного колонкового буріння, здебільшого, неефективне, оскільки його необхідно, із метою підтримки належної якості кернового опробування, здійснювати скороченими рейсами, завданням застосування яких є підвищення виходу зразків ГП. Вказане пов'язано також і з проявом явищ поглинання ПР, нестійкістю стінок свердловин, що зазвичай призводить до виникнення ускладнень і аварій. Тут виникає гостра необхідність застосування глинистих ПР і кріплення свердловин ОТ, а це істотно ускладнює організацію робіт та значно підвищує їхню кінцеву вартість. Саме за такого випадку переваги буріння із гідротранспортом керну є найбільш яскравими [46].

У формулу визначення відносної швидкості керна u_k при циркуляції ньютонівської рідини (2.35, 5.3) входить складова ρ_k – щільність зразків керна. Характер впливу щільності керна ГП на його відносну швидкість показаний в табл. 5.9. Діапазон розглянутих значень параметру ρ_k зразків ГП включає всі можливі її варіанти, характерні для геолого-літологічних умов застосування комплексів буріння із гідротранспортом керну ГП.

Таблиця 5.9

Розрахункові значення відносної швидкості керна u_k залежно від його щільності ρ_k при циркуляції в'язко-пластичної ПР

Зазор F	Щільність зразків керна ГП ρ_k , кг/м ³								
	1700	1900	2100	2300	2500	2700	2900	3100	3300
0,807	0,09	0,1	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	0,16
0,764	0,12	0,14	0,16	0,17	0,19	0,20	0,21	0,22	0,23
0,729	0,15	0,17	0,19	0,21	0,23	0,25	0,26	0,27	0,29
0,686	0,19	0,22	0,24	0,26	0,28	0,30	0,32	0,34	0,36
0,65	0,22	0,25	0,28	0,30	0,33	0,35	0,37	0,39	0,41
0,607	0,25	0,29	0,32	0,35	0,38	0,41	0,43	0,45	0,48
0,571	0,28	0,32	0,36	0,39	0,42	0,45	0,48	0,51	0,53

Розглядаючи дані табл. 5.9 можна зробити висновок, що відносна швидкість керна u_k зростає як зі збільшенням щільності керна при постійному F , так і при постійній щільності керна зі збільшенням зазору «кern - труба», причому інтенсивніше швидкість керна зростає зі збільшенням зазору між керном і внутрішньою трубою (що характерно і для в'язкої рідини).

Графічну інтерпретацію наявності фактору впливу щільності керна ρ_k на його відносну швидкість представлено на рис. 5.2.

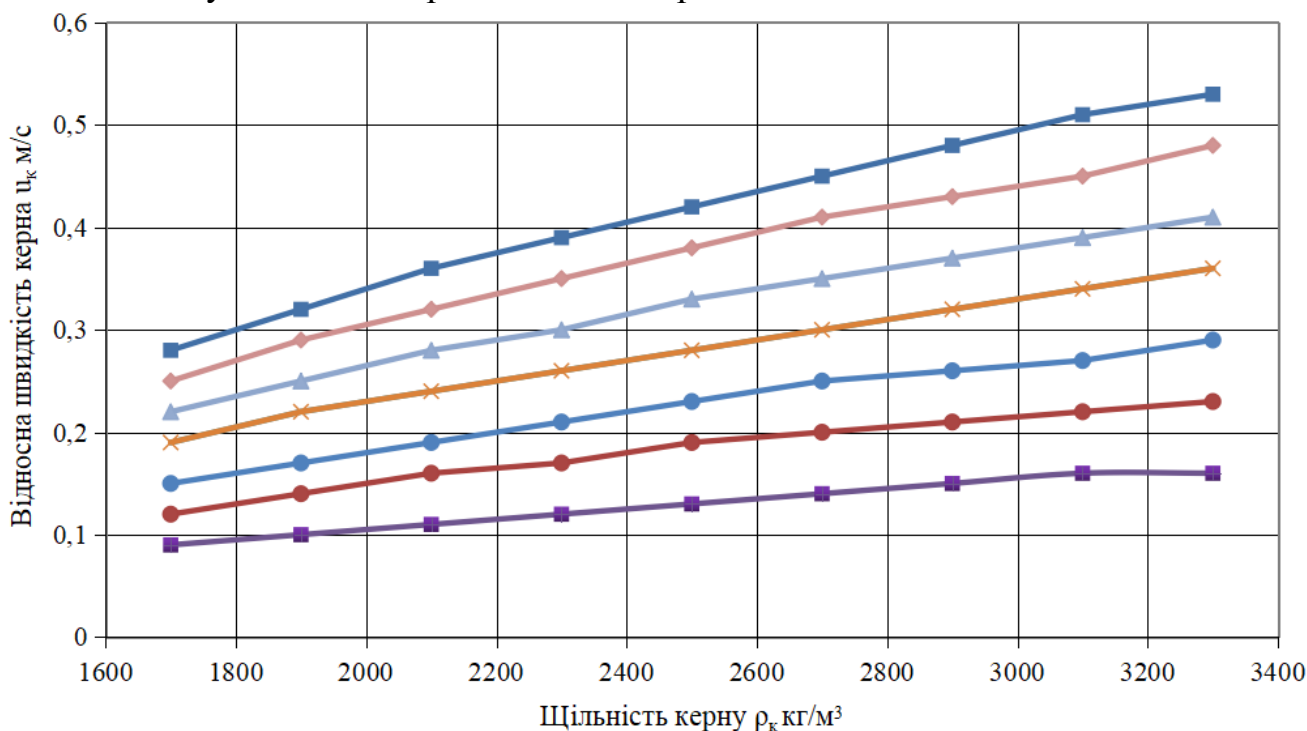


Рис.5.2. Залежність виду $u_k = f(\rho_k)$ при зазорі $F = 0,807 \div 0,571$, ОА – глинистий розчин (ВІР)

У табл. 5.10 та на рис. 5.3 - 5.4 наведені результати розрахунків відносної швидкості керна u_k при його змінній довжині від 0,2 до 1,2 м, розрахунки виконані з урахуванням промивання свердловин в'язко-пластичною ПР. Слід зауважити, що аналітичні розрахунки були проведені з урахуванням впливу різних складових перепаду тиску на транспортування зразків керна ГП.

Таблиця 5.10

Відносна швидкість керна u_k при промиванні свердловині ВПР

F	Довжина зразків керна ГП l_k , м										
	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2
0,807	0,13	0,16	0,18	0,21	0,23	0,24	0,26	0,28	0,29	0,31	0,32
	0,13	0,16	0,18	0,20	0,22	0,23	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29
0,764	0,19	0,23	0,26	0,29	0,32	0,35	0,37	0,40	0,42	0,44	0,46
	0,18	0,22	0,25	0,28	0,30	0,32	0,34	0,36	0,38	0,39	0,40
0,729	0,23	0,28	0,33	0,36	0,40	0,43	0,46	0,49	0,51	0,54	0,56
	0,22	0,27	0,31	0,35	0,38	0,40	0,43	0,45	0,47	0,49	0,50
0,686	0,28	0,35	0,40	0,45	0,49	0,53	0,57	0,60	0,64	0,67	0,70
	0,27	0,34	0,39	0,43	0,46	0,50	0,52	0,55	0,58	0,60	0,62
0,65	0,33	0,40	0,46	0,52	0,57	0,61	0,66	0,70	0,73	0,77	0,81
	0,32	0,39	0,44	0,49	0,53	0,57	0,60	0,63	0,66	0,69	0,71
0,607	0,38	0,47	0,54	0,60	0,66	0,71	0,76	0,81	0,85	0,89	0,93
	0,37	0,45	0,51	0,57	0,62	0,66	0,70	0,73	0,76	0,79	0,82
0,571	0,42	0,52	0,60	0,67	0,73	0,79	0,85	0,90	0,95	0,99	1,04
	0,41	0,50	0,57	0,63	0,69	0,74	0,78	0,82	0,85	0,88	0,92

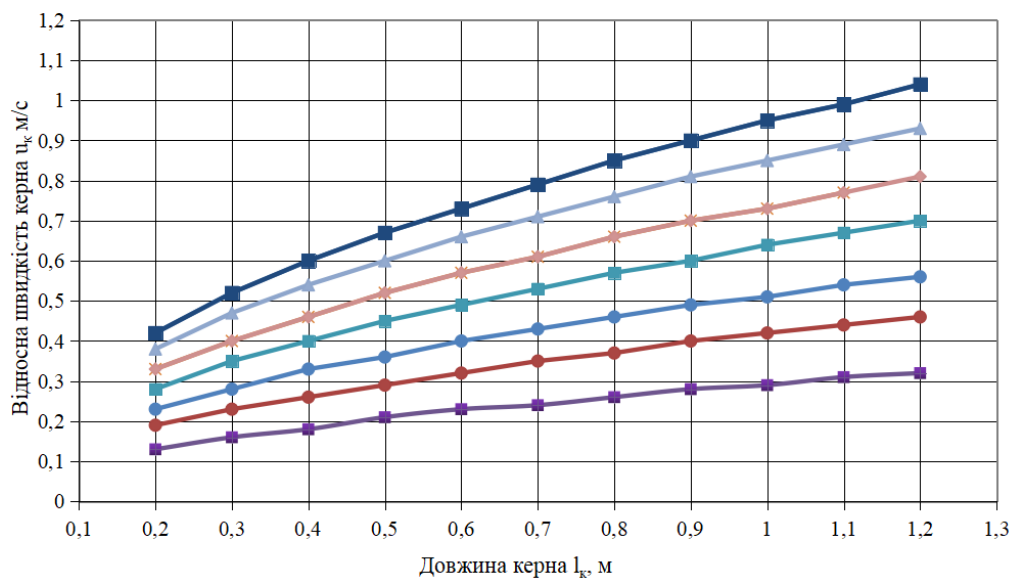


Рис.5.3. Залежність типу $u_k = f(l_k)$ при $F = 0,807 \div 0,571$, з урахуванням P_p , ОА – глинистий розчин (ВПР)

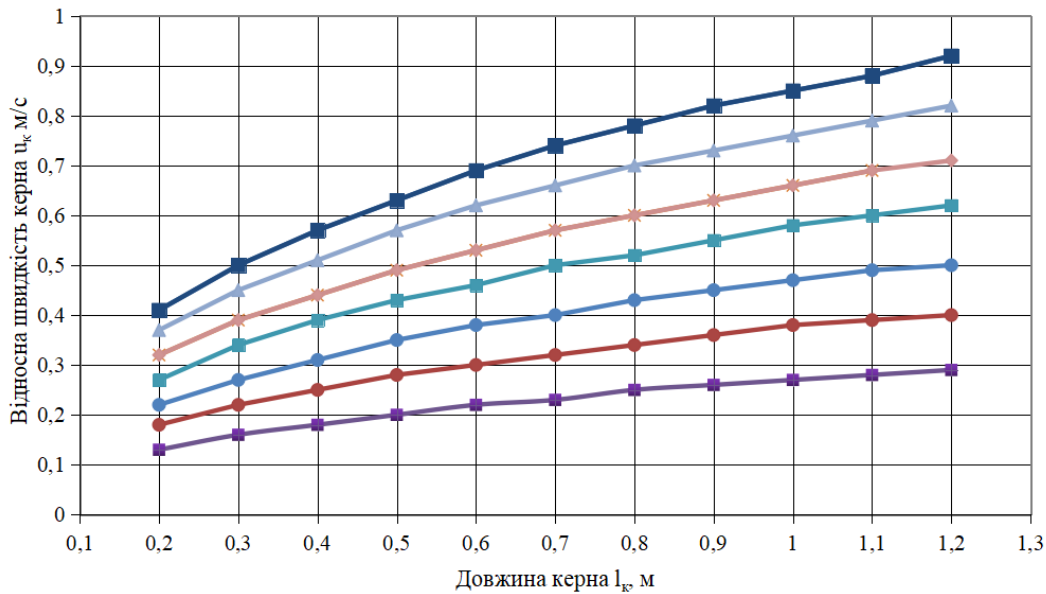


Рис. 5.4. Залежність виду $u_k = f(l_k)$ при $F = 0,807 \div 0,571$, з урахуванням P_d і P_e , ОА – глинистий розчин (ВІР)

За результатами аналізу наведених даних (табл. 5.10, рис. 5.3 - 5.4) можна зробити висновок, що швидкість u_k менш інтенсивно зростає зі збільшенням зазору «кern - труба», а помітніше – зі збільшенням довжини l_k при постійному F .

Оскільки формула (5.3) справедлива, коли l_k , не перевищує 0,2 м, розрахунками була отримана формула (5.4), призначена для обчислення відносної швидкості керна u_k , при довжині зразків породи, яка перевищує 0,2 м.

$$u_k = m \cdot \sqrt{\frac{2 \lg(\rho_k - \rho)(1 - \tau_0 F)^2}{\rho C_x K_l^2}}, \quad (5.4)$$

де m – поправочний коефіцієнт, який залежить від довжини керна, що транспортується, значення якого наведені в табл. 5.11.

Таблиця 5.11

Поправочний коефіцієнт m

Тип ОА	Довжина керна l_k , м					
	0,2 - 0,4	0,4 - 0,7	0,7 - 0,9	0,9 - 1,0	1,0 - 1,1	1,1 - 1,2
Глинистий розчин (ВІР)	0,95	0,91	0,89	0,88	0,86	0,86

Таблиця 5.12

Відсотковий вклад сили P_e у відносну швидкість керна u_k

F	Довжина керна l_k , м										
	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2
0,807	0	0	0	5	4	4	4	7	7	10	9
0,764	5	4	4	3	6	9	8	10	10	11	13
0,729	4	4	6	3	5	7	7	8	8	9	11
0,686	4	3	3	4	6	6	9	8	9	10	11
0,65	3	3	4	6	7	7	9	10	10	10	12
0,607	3	4	6	5	6	7	8	10	11	11	12
0,571	2	4	5	6	5	6	8	9	11	11	12

Відмітимо тут важливу обставину: коефіцієнт m фізично характеризує вклад сили P_e у відносну швидкість керна u_k (табл. 5.12).

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 5

1. Детально вивчено наявність і характер впливу складових перепаду тиску ($P_{л}, P_e, P_k$ та $P_{вх}$) на швидкість транспортування керна u_k при промиванні свердловин в'язко-пластичною промивальною рідиною.

2. Показано існування залежності безрозмірного коефіцієнта гідравлічного опору $\lambda_{кп}^*$ (щодо керна) від величини узагальненого параметра Рейнольдса ($Re_{кп}^*$), що визначає режим руху рідини, у цьому випадку, в кільцевому зазорі.

3. Розрахунками показано, що безрозмірний коефіцієнт $\lambda_{кп}^*$ є функцією кількох змінних, визначальними з яких є F (відношення площі перерізу потоку ПР в трубі F_0 до міделевої площі стовпчика керна F_M) і $Re_{кп}^*$. Причому, $Re_{кп}^*$ тут виступає як наслідок швидкісних співвідношень у парі «кern - потік бурової в'язко-пластичної рідини». Крім того, значних змін $\lambda_{кп}^*$ зазнає тільки при зміні швидкості протікання означеної рідини в кільцевому зазорі між керном і трубою (а саме у випадку $1 < Re_{кп}^* < 100$), збільшення ж самого кільцевого зазору досить помітного впливу на значення $\lambda_{кп}^*$ практично не чинить.

4. Порівняльним аналізом доведено, що визначальним параметром у величині відносної швидкості керна u_k (при його стандартній довжині та циркуляції в'язко-пластичної промивальної рідини) є $P_{л}$ – сила лобового опору. Ця обставина дала можливість отримати уточнену формулу визначення відносної швидкості u_k , яка відрізняється простотою та можливістю отримання швидкісних характеристик руху зразків гірської породи у вигляді кернів породи без прийняття певних припущень про їх транспортування у в'язко-пластичній рідині.

5. Розглянуто вплив геометричних розмірів кернової магістралі, щільності та довжини зразків породи на швидкість руху її кернів u_k . Розрахунками показано, що відносна швидкість керна зростає як зі збільшенням щільності керна при постійному F (площинно-швидкісний коефіцієнт F), так і при постійній щільності зі збільшенням зазору «кern - труба», причому інтенсивніше швидкість керна зростає зі збільшенням зазору між керном та внутрішньою трубою.

6. Можна вважати доведеним, що для забезпечення безперебійного транспортування зразків породи значної щільності необхідно прагнути до мінімальної величини кільцевого зазору між керном і трубою.

7. Оцінено вплив на відносну швидкість керна u_k довжини зразків породи. Показано, що відносна швидкість керна менш інтенсивно зростає зі збільшенням зазору «кern - труба», а більше – зі збільшенням довжини при постійному зазорі F . Дана обставина свідчить про те, що ефективне транспортування кернового матеріалу можливе тільки за його певної довжини ($l_{max} = const$) для деякої величини поперечного розміру зразків гірської породи.

8. Підкреслимо наступне: для всіх описаних випадків параметр u_k значно нижчий за такий, що є характерним для аналогічних геолого-технічних умов та реалізації технології промивання свердловини в'язкою рідиною.

РОЗДІЛ 6. ВПЛИВ ЦИРКУЛЯЦІЙНИХ СЕРЕДОВИЩ НА МЕХАНІЗМ РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД ПРИ РІЗНИХ СПОСОБАХ БУРІННЯ

6.1 Деякі загальні питання фізики руйнування гірських порід

Всі тверді тіла, в тому числі і метали, з яких зроблений буровий ПРІ, неоднорідні за властивостями показника міцності [73]. 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 [14].

Назвемо, до прикладу, основні причини докритичного зростання тріщин у металах при порівняно низьких навантаженнях: нестационарність 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 напруги, 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 природжень тріщин.

З різноманіття праць [74], 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 рі-

зновисотністю 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 [75].

У процесі тертя можна виділити дві головні функції процесу змащування: здатність створювати міцні плівки на поверхні третювих матеріалів, із задовільним утриманням мастила на краях тріщин в результаті адсорбції молекул, та спроможність взаємодіяти з поверхневими шарами третювих 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, 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 [14]:

$$\sigma = \sqrt{\frac{2\alpha E}{\pi l(1-\mu^2)}}, \quad (6.1)$$

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

В багатьох випадках, для пояснення поведінки твердих тіл при механічному навантаженні, використовують найбільш фізично обґрунтовану кінетичну концепцію міцності, сутність якої вперше сформулював С.М. Журков. В її основі лежить положення про руйнування як процес, у якому провідна роль нале-

жить тепловому руху, тепловим коливанням і, особливо, тепловим флуктуаціям. У фізико-технічному інституті ім. А.Ф. Іоффе, під керівництвом С.М. Журкова були проведені дослідження залежності міцності на розрив понад 50 різноманітних твердих тіл з різною структурою та природою міжатомних зв'язків від часу та температури; формульний вираз значення міцності, в результаті випробувань металу, полімеру та монокристалу кам'яної солі, був представлений у вигляді термофлуктуаційного рівняння

$$\tau = \tau_0 \exp \frac{(U_0 - \gamma \cdot \sigma)}{k \cdot T}, \quad (6.2)$$

де τ – довговічність тіла (досліджуваного зразка), що руйнується; τ_0 – передекспоненційний множник, який має розмірність часу; U_0 – величина енергії активації або величина енергетичного бар'єру, що має вплив на швидкість процесу руйнування тіла; γ – структурно-чутливий коефіцієнт, величина якого дорівнює добутку активаційного об'єму на коефіцієнт локального перенапруження; σ – напруга при розтягуванні досліджуваного зразка; T – температура.

Відповідно до основних теоретичних уявлень Я.І. Френкеля про тепловий рух у твердих тілах, був зроблений проміжний висновок про те, що механізм руйнування твердих тіл (досліджуваних зразків) являє собою кінетичний процес поступового розриву міжатомних зв'язків під дією теплових флуктуацій і механічної напруги, який можна розділити на такі стадії: збудження зв'язків, що розриваються, механічним навантаженням; розрив зв'язків під впливом теплових флуктуацій; накопичення розірваних зв'язків з утворенням мікротріщин, в результаті чого тіло втрачає стійкість і розривається на частини.

Опубліковані експериментальні дані дають підставу вважати, що для більшості твердих тіл механічне руйнування під навантаженням на різних стадіях процесу слід розглядати як механохімічну реакцію розпаду міжатомних зв'язків [76].

Силове збурення міжатомних зв'язків досліджуваних ГП при навантаженні, пов'язане зі значним ступенем деформування електронних оболонок і збудженням міжатомних зв'язків, у присутності ПР сприяє розриву зв'язків за рахунок різкого зниження граничного рівня енергії активації.

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 [77]. 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 [78].

Слід звернути увагу на дуже важливу обставину: лише зони передруйнування недостатньо, щоб проявилася дія рідин або адсорбційних шарів. Зона передруйнування виникає при будь-якому типі руйнування ГП, наприклад, при вимірюванні твердості ГП за методом вдавлювання, але якщо дія руйнівної сили не повторюється, то активовані ПАР рідини або зовсім не дають відповідного ефекту, або він зводиться виключно до змащувальної дії. Для прояву впливу рідини або адсорбційних шарів необхідно, щоб процес руйнування періодично повторювався і зона передруйнування могла перетворюватися на зону руйнування.

Слід виділити найбільш поширені види корозійного руйнування твердих тіл – втомне і розтріскування, які відбуваються в результаті зародження і розвитку специфічних корозійно-механічних тріщин.

Метали і сплави, що застосовуються в буровій справі, мають у собі дефекти різного походження (тріщини, порожнини і неметалеві включення), які знижують їх міцність та виступають джерелом зародження тріщин. При механічному навантаженні полікристалічних матеріалів враховуються розміри вже наявних у тілі початкових дефектів, які переростають у тріщини.

Активний вплив середовищ на процеси зародження та розвитку корозійних тріщин під дією механічної напруги зводиться до таких основних факторів [14]: локальна корозія напруженого металу у вершині тріщини; водневе розміцнення металу внаслідок наявності в ньому розчиненого водню, який надходить у метал із середовища; значне адсорбційне зниження міцності металу внаслідок адсорбції з його поверхні компонентів того або іншого середовища.

Перелічені чинники найчастіше виявляються одночасно, комбінуючись один з одним і впливаючи один на одного. Корозійно-механічне руйнування досліджуваного матеріалу відбувається за такою схемою: на поверхні напруженого металу виникає безліч корозійно-механічних пітінгів, на дні яких і зароджуються тріщини (етап зародження тріщини); тріщини, що зародилися, розгалужуючись, заглиблюються в тіло матеріала (при цьому одна з них, обминаючи інші у своєму розвитку, згодом стає концентратором напруг, які розвиваються з наростаючою швидкістю – етап розвитку тріщини); лавиноподібне руйнування матеріалу за місцем магістральної тріщини – так званий етап долому матеріалу за місцем магістральної тріщини. Наведені відомості є базисними для побудови теорії абразивно-механічного ударного способу буріння.

6.2 Сутність методів дослідження процесу руйнування гірських порід та його енергоємності

При дослідженні різноманітних фізико-механічних характеристик ГП часто приймаються методи, розроблені для металів та інших матеріалів, причому в багатьох випадках ці методи, здебільшого, розроблені спеціально для вивчення властивостей зразків з різних матеріалів [79]. Саме тому доцільним тут є застосовуються методичної та термінологічної баз, що відображають вид навантаження досліджуваних зразків – на стиск, на розрив, на вигин і т.д. Зауважимо, що при руйнуванні масиву ГП є завдання відокремити елемент ГП з найменшими витратами ресурсів – матеріальних, енергетичних та трудових. Тому необхідно виділити ті методи, які найбільш відповідають цим обмеженням.

Всі розроблені методи визначення механічних властивостей ГП можуть бути розбиті на ряд груп відповідно до характеру напруженого стану, який виникає в зразку при випробуванні. Слід зазначити, що поле напруг у зразку майже завжди ускладнене додатковими системами напружених станів, які мають другорядне значення і тому можуть не прийматися до розрахунків [79]. Найбільшою групою визначення основних механічних властивостей ГП є випробування, що проводяться для визначення тимчасового опору породи елементарним видам напруг – одновісний стиск та розтяг, зсув, вигин, кручення і т.д. Експериментальні дані щодо впливу ГС тиску отримані, в основному, при дослідженнях методом статичного та динамічного вдавлювання, а також при випробуваннях ГП на одновісне стиснення [80].

Також застосовуються методи досліджень пружних характеристик порід при поширенні в них хвиль зсувів з малою амплітудою (ультразвукові, імпульсні, резонансні та ін. методи) [81]. У табл. 6.1 наведено основні способи випробувань ГП на опір руйнуванню. Розглянемо більш детально методи, що застосовуються для дослідження порід при простих видах напружених станів.

Випробування на одновісне стиск є одними з найпоширеніших лабораторних методів загальної оцінки властивостей міцності ГП [82]. Критерієм міцності, що визначається при цих випробуваннях, є тимчасовий опір одновісному стиску (роздавлюванню). Цей показник називають також межею міцності на одновісний стиск (роздавлювання); він визначається за формулою:

$$\sigma_{cm} = \frac{F}{S}, \quad (6.3)$$

де F – величина прикладеного зусилля в момент руйнування зразка ГП, Н; S – площа поперечного перерізу досліджуваного зразка, см².

Наведена формула можлива до адекватного застосування у тому випадку, якщо при руйнуванні ГП напружений стан зразка є одновісним та рівномірним. Такий стан притаманний лише віддаленим від торців зразка поперечним перерізам при цілком певному співвідношенні висоти зразка h і діаметра d ($h > 2d$) і відповідної обробки торцевих контактних площин.

При порівнянні зовнішнього вигляду поверхонь, за якими відбувається руйнування зразків ГП в умовах одновісного стиснення, розрізняють такі типи

руйнування: за площиною, паралельною спрямовуванням стискаючих зусиль (шляхом відриву) та за площиною, нахиленою приблизно під кутом в 45° щодо напрямку стиснення (шляхом зсуву) (рис. 6.1, а, б). Перший тип руйнування є типовим для крихких матеріалів, другий – для пластичних тіл. Більшість порід за умов статичного навантаження руйнується шляхом зсуву.

Таблиця 6.1

Способи експериментального визначення опірності ГП руйнуванню

Вид руйнівного навантаження	Спосіб випробування	Визначувані показники	Примітки
Одновісний напружений стан:			
Стискування	Навантаженням, розподіленим рівномірно вздовж утворюваним і перпендикулярно до неї	F, E, ν, σ_{cm} $\sigma_{cm} = \frac{F}{S}$	Велика похибка, високі вимоги до експерименту
Розтягування	<i>Прямі:</i> Зразки з надрізом Зразки без надрізу <i>Непрямі:</i> Зовнішній тиск Тиском зсередини <i>Розрив поперечним вигинном:</i> На кінцевих опорах З опорою по контуру У масиві	F, ν, E, σ_p $\sigma_p = \frac{F}{S}$ $\sigma_p = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{F}{lh}$ $\sigma_p = \frac{2M_{зг}}{abh^2}$	Велика похибка, високі вимоги до експерименту, опосередковане визначення параметрів
Складний напружений стан			
Стискування	Метод співвісних пуансонів	$\sigma_x = \sigma_y = \nu \frac{R^2 - r^2}{2R^2} \sigma_n$	Всебічний стиск об'єму між пуансонами визначається розмірами зразка
Вдавлювання	Вдавлювання штампу в зразок	$\sigma_z = p \left[-1 + \frac{Z^3}{(r^2 + Z^2)^{\frac{2}{3}}} \right]$	Високі вимоги до шліфування поверхні, до паралельності
Розтягування	В камері високого тиску	F, ν, E, σ_p $\sigma_p = \frac{F}{S}$	Велика похибка, високі вимоги до експерименту
Кручення	Крутний момент прикладається до циліндричного зразка	$\sigma = q \cdot \sin 2\alpha + p$ $\tau = q \cdot \sin 2\alpha$	Вимоги до геометрії зразка, неоднорідний розподіл навантаження
Зріз	Навантаження прикладене під кутом до вісі зразка	$\sigma = \frac{F}{S} (\cos \alpha + f \sin \alpha)$ $\tau = \frac{F}{S} (\sin \alpha - f \cos \alpha)$	Непряме визначення параметрів

Примітки до позначень, які приведені в таблиці: F – прикладена сила; E – модуль Юнга; ν – коефіцієнт Пуассона; σ_{cm} , σ_p , τ , σ_n – напруги стиснення, розтягування, дотичні, під пуансонами відповідно; σ_x , σ_y , σ_z – напруги по вісі x , y , z відповідно; M – згинальний момент; l , h , R , a , b – геометричні розміри досліджуваного зразка; α – кут застосування навантаження; p – тиск; S – площа контакту; V – об'єм зруйнованої породи.

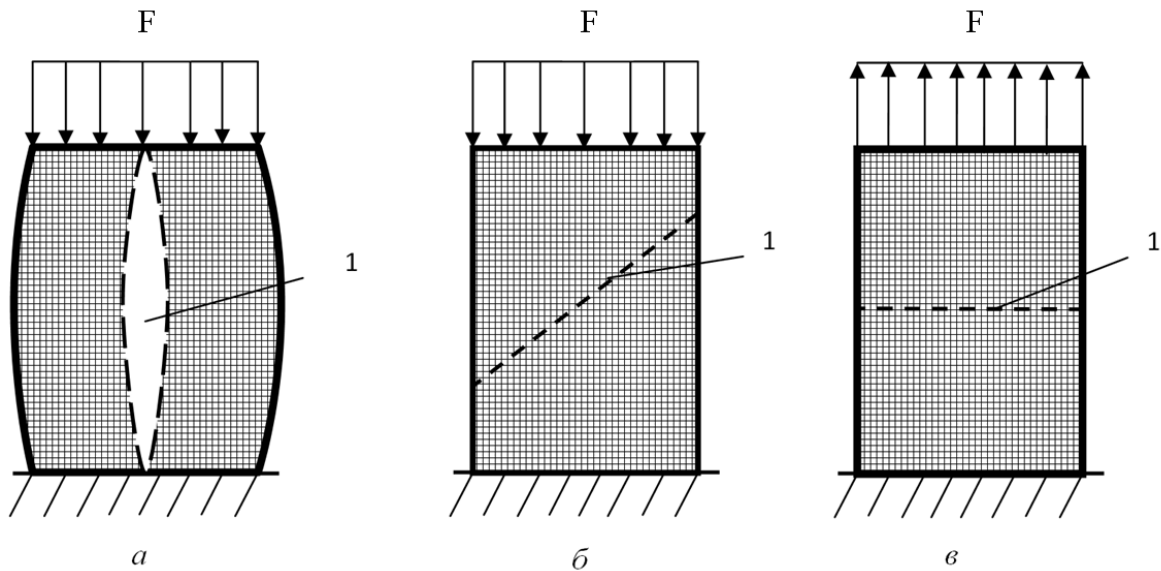


Рис. 6.1. Схеми руйнування зразка породи при випробуваннях на одновісне стиснення та розтягування: *а* – стиск; *б* – зсув при стисканні; *в* – розрив (*F* – навантаження; 1 – поверхня руйнування)

Головну складність у проведенні випробувань на стиск представляє виготовлення зразків ГП правильної форми. Зразки повинні виготовлятися з цільних монолітів керна, які не мають тріщин та інших видимих порушень. При виготовленні також необхідно дотримуватися суворої паралельності торців.

Отримати значення міцності на розрив, у її «чистому» вигляді, можна лише за прямого розтягуванні зразків ГП. Вважається [80], що достовірне визначення значень «чистої» міцності порід на розрив, встановлення середніх абсолютних значень цього показника та статистичних характеристик його коливання, представляє великий пізнавальний інтерес і має принципове науково-методичне значення для вирішення питання про можливу сферу застосування аналітичних методів розрахунку способів руйнування ГП.

Процес руйнування матеріалу, викликаний дією напруг розтягнення, називають розривом. Стосовно ГП зазвичай використовують інший термін – «відрив», оскільки при бурінні свердловин завдання полягає не в розриві моноліту ГП на окремі частини, а у ефективному відділенні їх від вибою.

Необхідно відмітити наступну важливу обставину (за даними Пащенко О.А.): оскільки проведення достовірних досліджень опірності ГП відриву безпосередньо на вибої споруджуваної свердловини, при сучасному рівні вимірювальної та бурової техніки неможливе, то розроблено і застосовується кілька прямих та непрямих способів її визначення у лабораторних та польових умовах.

При випробуванні на одновісне розтягування (рис. 6.1, *в*), як і при випробуванні на стиск, визначаються пружні характеристики та межа міцності ГП. Межа міцності ГП на розтяг визначається формулою, аналогічною для визначення характеристик одновісного стиску. Механічні випробування з метою визначення меж міцності ГП при одновісному розтягуванні є дуже трудомісткими з технічного виконання та вибору форми зразка, а також способу його закріп-

лення в захватах. Для анізотропних матеріалів, якими є більшість ГП, не придатні циліндричні зразки, оскільки у ГП коефіцієнти пружності та характеристики міцності за взаємно перпендикулярними напрямками, зазвичай, не однакові.

Внаслідок значної складності прямого визначення опору ГП розриву, межа міцності на відрив досить часто розраховується за даними випробувань досліджуваних зразків при інших напружених станах. Розроблено та застосовується метод визначення тимчасового опору розтягу за даними випробування круглої пластини ГП на вигин при навантаженні її пуансоном, прикладеним до центру диска. Пуансон має робочу поверхню у вигляді кільця, розміри якого вибираються залежно від діаметра пластини досліджуваного зразка породи.

Тимчасовий опір ГП зсуву (сколюванню), зазвичай, визначають при випробуваннях на зріз або на кручення (рис. 6.2). Випробування на зріз дозволяють отримувати дослідні значення нормальної і дотичної напруги в площині зсуву, кутів внутрішнього тертя і величини зчеплення.

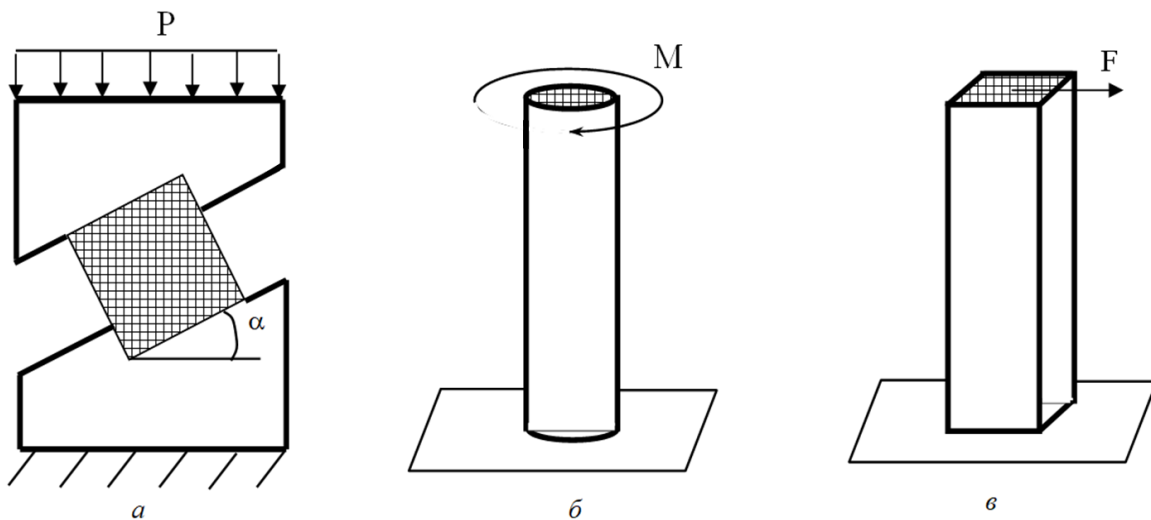


Рис. 6.2. Схеми дослідження механічних властивостей гірських порід при зсуві (а), крученні (б) і згині (в)

Дослідження характеру розподілу напруг оптичним методом, проведені на зразках, підданих одиночному зрізу в похилих матрицях, дозволили встановити, що в середніх частинах майданчика зрізу нормальні σ та дотичні τ напруги розподілені рівномірно. Значення нормальних та дотичних напруг при одиночному зрізі визначаються за наступними формулами:

$$\sigma = \frac{P}{S}(\cos \alpha + f \sin \alpha); \quad (6.4)$$

$$\tau = \frac{P}{S}(\sin \alpha - f \cos \alpha). \quad (6.5)$$

де S – площа зрізу; f – коефіцієнт тертя; α – кут зрізу зразка у матриці.

Вказаний вид випробувань поширений, переважно, щодо методик визначення коефіцієнтів внутрішнього тертя і зчеплення ґрунтів.

Випробування ГП на кручення не набули скільки-небудь значного поширення. Встановлено, що при випробуванні на кручення вугілля та ряду інших

ГП, їх руйнування відбувається в результаті відриву, а не зсуву. Зміна форми зразків для запобігання прояву розтягуючої напруги не дало потрібного ефекту.

При випробуванні ГП на крутіння визначається модуль зсуву та межа міцності. Для розрахунку останньої застосовується така формула:

$$[\sigma_{кр}] = M_{кр} / W_{кр}, \quad (6.6)$$

де $M_{кр}$ – максимальний крутний момент; $W_{кр}$ – момент опору під час кручення.

В свою чергу, момент опору під час кручення визначається за формулою:

$$W_{кр} = \frac{\pi r^3}{2} = \frac{\pi d^3}{16}, \quad (6.7)$$

де r – радіус робочого перерізу досліджуваного зразка ГП.

Випробування на вигин проводять як на консольно закріплених, так і на зразках у вигляді балок, що лежать на двох опорах [83]. При обробці результатів випробувань порід на вигин дуже важко враховувати пластичні деформації, у разі яких можливі істотні зміни у механічних характеристиках.

Міцність досліджуваних зразків породи на вигин:

$$[\sigma_{зг}] = \frac{M_{зг}}{W_{зг}}, \quad (6.8)$$

де $M_{зг}$ – максимальний згинальний момент для даного типу ГП; $W_{зг}$ – момент опору перерізу зразків досліджуваних ГП вигину.

Стосовно ГП метод випробування на вигин дає кращі результати, ніж у випадку металів, через малі величини пластичних деформацій порід. Теоретично в означених умовах межі міцності на розрив і вигин мають бути рівними.

Основним недоліком розглянутих способів механічних досліджень є те, що в площині зсуву крім напруг, які зсувають, виникають також нормальні напруги від вигину, чисельна величина яких залишається невідомою (поява нормальних напруг суттєво спотворює результати випробування).

Зіставлення межі міцності на розтяг $[\sigma_p]$ для деяких ГП з межею їх міцності на зсув $[\sigma_{зс}]$ наведено в табл. 6.2, а на вигин $[\sigma_{зг}]$ у табл. 6.3.

Як бачимо, з даних розглядуваних таблиць, випробувані ГП витримували на зсув, загалом, в 2,4 разу більше навантаження, ніж при розтягуванні. Середнє співвідношення дослідно-отриманих меж міцності на вигин $[\sigma_{зг}]$ і на розтяг $[\sigma_p]$ виявилось практично таким самим, як і при зіставленні $[\sigma_p]$ з межею міцності на зсув $[\sigma_{зс}]$, при діапазоні змін означених показників 1,01 - 3,73.

Таблиця 6.2

Значення міцності ГП при випробуваннях на розтягування та зсув [31]

Гірська порода	$[\sigma_p]$, ГПа	$[\sigma_{зс}]$, ГПа	$[\sigma_{зс}]/[\sigma_p]$
Граніт	0,125	0,200	1,6
Вапняк	0,120	0,180	1,5
Кварцит	0,129	0,179	1,4
Мармур	0,110	0,275	2,5
Пісковик	0,065	0,230	3,5
Вугілля	0,016 - 0,020	0,25 - 0,90	1,6 - 4,5
В середньому			2,0 - 2,5

Таблиця 6.3

Значення міцності ГП на розтягування та вигин

Гірська порода	$[\sigma_p]$, ГПа	$[\sigma_{3c}]$, ГПа	$[\sigma_{3c}]/[\sigma_p]$
Пісковики крупнозернисті	<u>0,00443</u>	<u>0,0111</u>	<u>2,53</u>
	0,00525	0,0103	1,96
Пісковики середньозернисті	<u>0,0077</u>	<u>0,0226</u>	<u>2,94</u>
	0,0052	0,0194	3,73
Пісковики дрібнозернисті	<u>0,0083</u>	<u>0,0156</u>	<u>1,88</u>
	0,00725	0,0073	1,01
У середньому			<u>2,45</u> 2,23

Примітка: у чисельнику наведено значення, отримані в результаті випробування зразків ГП паралельно їх шаруватості, у знаменнику – перпендикулярно шаруватості

Як бачимо, з даних розглянутих таблиць, випробувані ГП витримували на зсув, загалом, в 2,4 разу більше навантаження, ніж при розтягуванні. Середнє співвідношення дослідно-отриманих меж міцності на вигин $[\sigma_{3c}]$ і на розтяг $[\sigma_p]$ виявилось практично таким самим, як і при зіставленні $[\sigma_p]$ з межею міцності на зсув $[\sigma_{3c}]$, при діапазоні змін означених показників 1,01 - 3,73.

Загалом, за інших рівних умов досліджень, міцність ГП, залежно від виду деформації, підпорядковується наступній умові:

$$[\sigma_{cm}] > [\sigma_{3c}] > [\sigma_{3c}] > [\sigma_p]. \quad (6.9)$$

Як бачимо з нерівності, з огляду на необхідність створення ефективної схеми руйнування ГП, найвигіднішим видом деформації є відрив.

Багато відомих дослідників [30, 67–68] відзначають, що ГП опираються розтягуванню значно гірше, ніж стиску, та за деякими даними [14] в 8 - 20 разів. Дуже низькі відносні величини опірності ГП розтягуванню – на цілий порядок нижче, ніж стиску і майже в 2,5 рази нижче, ніж зсуву та вигину – створюють передумови застосування способу руйнування ГП саме відривом.

Фактичними значеннями характеристики опірності різних ГП руйнуванню відривом корисно володіти при оцінці потенційних можливостей різних способів руйнування, створенні технічних засобів для ефективного руйнування вибою свердловини та виборі режиму руйнування, аналізі результатів дослідження процесів руйнування та вивченні закономірностей цих процесів.

Класифікація ГП за будь-якою однією механічною характеристикою неспроможна дати повного розуміння поведінки ГП при руйнуванні у різних технологічних процесах, зокрема при бурінні свердловин [84], оскільки у цьому разі реалізується складний напружений стан від стиску до розтягування.

З методів визначення механічних властивостей ГП, за умов реалізації складних напружених станів, необхідно розглянути найпоширеніші. До них, передусім, відносяться методи вдавлювання циліндричного штампю з плоскою основою та руйнування диска породи співвісними пуансонами.

При випробуваннях міцності порід при складному напруженому стані за допомогою співвісних пуансонів [82], зразок ГП, який має форму диска, наван-

тажується по своєму центрові двома співвісними пуансонами. Величина бічного тиску в об'ємі породи в центральній частині дорівнюватиме:

$$\sigma_x = \sigma_y = \nu \frac{R^2 - r^2}{2R^2} \sigma_n, \quad (6.10)$$

де σ_n – середній нормальний тиск під пуансоном; R – радіус досліджуваного зразка ГП; r – радіус застосовуваного для досліджень пуансона.

Найшвидше визначити механічні властивості ГП, при складному напруженому стані, можна методом вдавлювання в породу циліндричного штампу з плоскою основою; при таких умовах в ГП виникає складний об'ємно-напружений стан, причому уздовж вісі симетрії Z напруги розподіляються так (в розглядуваному випадку вертикальна нормальна напруга):

$$\sigma_z = p \left[-1 + \frac{Z^3}{(r^2 + Z^2)^{\frac{2}{3}}} \right], \quad (6.11)$$

де p – тиск по поверхні контакту; r – горизонтальні нормальні напруги $\sigma_x = \sigma_y$, які визначаються інтегруванням за площею кола штампу

$$\begin{aligned} \sigma_x = \sigma_y &= \frac{p}{2} \int_0^d \left[-2(1+\nu)Z(r^2 + Z^2)^{-\frac{3}{2}} + 3Z^3(r^2 + Z^2)^{-\frac{5}{2}} \right] r dr = \\ &= \frac{p}{2} \left[\frac{2(1+\nu)Z}{\sqrt{d^2 + Z^2}} - \frac{Z^3}{\sqrt{(d^2 + Z^2)^3}} - (1+2\nu) \right]. \end{aligned} \quad (6.12)$$

де d – діаметр індентора (штампа); Z – відстань за віссю z .

Аналітичне розв'язання задачі визначення напруженого стану в інших точках напівпростору при втисканні жорсткого штампу дано у деяких дослідницьких роботах [14]. Недоліком наведеного методу є сурові вимоги до якості полірування поверхні та дотримання паралельності (згідно досліджень Пашенка О.А.).

Метод вдавлювання штампу знайшов досить широке застосування, оскільки створюваний в породі при вдавлюванні напружений стан, є аналогічний напруженому стану в масиві ГП при різних технологічних методах його руйнування та багатьох геологічних процесах, пов'язаних із зануренням більш міцних і жорсткіших елементів у більш м'які, пластичні та інші породи.

В умовах тривісного напруженого стану, що створюється за допомогою ГС тиску, проводяться випробування ГП на поздовжній стиск та розтяг, зріз, вигин, кручення. Методи випробування на поздовжнє стискування і розтягування в умовах ГС тиску, створюваного в камерах високого тиску, набули найбільш широкого поширення. Умови проведення випробувань у даному випадку повинні забезпечувати однорідність напруженого стану.

Випробування на поздовжнє стискування та розтягування в умовах наявності впливу ГС тиску, зазвичай, здійснюються у спеціальних установках – камерах високого тиску. Зразок у такому випадку необхідно надійно захищати від контакту з рідиною, яка створює тиск, спеціальним покриттям або тонкими металевими оболонками. Застосовувані для цих випробувань спеціальні дослідни-

цькі установки відрізняються великою різноманітністю як за конструкцією, так і за методиками вимірювань, що застосовуються.

У цілому, методики визначення фізико-механічних властивостей ГП в умовах ГС тиску мають ті ж недоліки, як і загальноприйняті, та до них додається фактор наявності камер високого тиску і пристроїв для його отримання.

Як тепер стає зрозумілим, розглянуті методики визначення якогось одного з механічних параметрів ГП не дозволяють оцінити процес руйнування в цілому та виявити ступінь і характер впливу ГС тиску. Оскільки при бурінні свердловин, як і при будь-якому іншому технологічному процесі, на руйнування об'єму ГП витрачається енергія, ефективність циклу руйнування найбільш достовірно оцінюється кількістю енергії, що витрачається на відділення одиниці об'єму ГП, тобто це визначається енергоємністю процесу – саме вона характеризує прояв усієї суми механічних властивостей ГП, притаманних цьому процесу руйнування та впливовим факторам його реалізації.

Витрата енергії на подрібнення (диспергування) ГП визначається відомими енергетичними законами руйнування: законом Ріттінгера (1867 р.), згідно якого «робота, витрачена при дробленні, пропорційна знову отриманій (оголеній) поверхні подрібненого матеріалу або ступеню подрібнення» та законом Кирпичова (1874 р.), сформульованого в такий спосіб «енергія, необхідна для однакової зміни форми геометрично подібних і однорідних тіл, змінюється як об'єми чи ваги цих тіл»; останній закон називається законом подібності й іноді формулюється інакше: енергія, витрачена на дроблення геометрично подібних тіл при однаковому напруженому стані пропорційна об'ємам тіл, що руйнуються.

При застосуванні цих законів передбачається: при руйнуванні фізична природа тіла залишається незмінною і руйновані тіла однорідні [85].

Експериментально встановлено, що при тонкому подрібненні мінеральних тіл закон Ріттінгера виконується з великою точністю, а закон Кирпичова однозначно не підтверджується. Що стосується дроблення за наявності великих розмірів тіла (0,5 - 1 мм), тобто при малій дисперсності, витрати роботи за законом подібності будуть дещо більшими, ніж за законом Ріттінгера.

Так звана об'ємна енергоємність руйнування визначається відношенням кількості витраченої енергії до одиниці зруйнованого об'єму ГП. Порода в зоні руйнування може дробитися і диспергуватися, відповідно збільшуватиметься знову утворена поверхня руйнування, що паралельно супроводжується зростанням кількості енергії, витраченої на її появу. Відповідно відміченому загальна кількість енергії на руйнування одиничного об'єму ГП залежить від ступеня подрібнення ГП або від площі новоутвореної поверхні (поверхнева енергія руйнування). При цьому, чим більша знову утворена поверхня або ступінь диспергування породи, тим більш енергоємним є процес руйнування і навпаки.

Дослідженню важливого завдання визначення енергоємності та фізико-механічних параметрів ГП різними методами присвячені роботи багатьох дослідників [14]. Аналіз вказаних результатів показав, що процес руйнування ГП має свій власний критерій – енергоємність руйнування, способи визначення якої тут і розглядаються. Наприклад показано, що для крихко-пластичних порід

існує універсальна циклічна залежність питомої енергії руйнування від кінетичної енергії удару, яка встановлена експериментальним шляхом; не розкривається фізика даної циклічності, яка має максимальні та мінімальні значення питомої енергії руйнування даної ГП, а лише вказується на необхідність її знання для визначення оптимальних режимів руйнування [55].

Аналіз значної кількості дослідницьких робіт дозволяє зробити висновок, що методи визначення фізико-механічних параметрів ГП, необхідні для вивчення міцності та абразивності, не мають єдиного міжнародного стандарту для техніки проведення досліджень та обробки одержаних результатів. Пояснити такий стан справ можна, наприклад, відсутністю ясної та простої теорії механіки руйнування ГП, а використання класичної теорії статичної та динамічної пружності в даній галузі вимагає знань окремих параметрів середовища.

Оскільки, як було розглянуто раніше, в межах понять міцність і абразивність неможливо точно вирішити задачу оптимізації процесів буріння свердловин, розглянемо енергетичну сутність методик руйнування ГП.

У загальному випадку енергія на руйнування деякого об'єму ГП (назвемо його тут рівнянням Л.О. Шрейнера [14]) дорівнює:

$$A = A_v V, \quad (6.13)$$

де A_v – енергія руйнування одиничного об'єму, V – об'єм зруйнованої породи.

Енергія на руйнування ГП, що віднесена до одиниці об'єму ГП або значення величини знову утвореної поверхні, відповідно, буде дорівнювати:

$$A_v = \frac{25\sigma_{uu}(1-\sigma^2)\pi^2 r^3 k_n}{E} \sqrt{V}$$

або

$$A_s = \frac{2,5\sigma_{uu}(1-\sigma^2)\pi r k_n}{E} \sqrt{S}, \quad (6.14)$$

де r , S – радіус і площа робочого штампа відповідно, E – модуль Юнга породи, V – об'єм зруйнованої породи, k_n – коефіцієнт пластичності ГП, σ_{uu} – міцність по штампу досліджуваної ГП, σ – нормальні напружки.

Енергія на руйнування об'єму та площі відповідно (рівняння Мізеса):

$$A_v = \frac{3}{2E}(1-2\sigma)\sigma_n^2 \sqrt{V},$$

або

$$A_s = \frac{(1+\sigma)}{3E}\sigma_{sc}^2 \sqrt{V}, \quad (6.15)$$

Енергія руйнування деякого об'єму ГП (рівняння Шелковнікова І.Г.):

$$A_v = \frac{S_{pn}^2 \rho^2 V_{ps}^2 V_{mv}^2}{4[\sigma_d] \cdot l \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right)}, \quad (6.16)$$

де $[\sigma_d]$ – динамічна міцність породи; S_{pn} – площа контакту леза різця ПРІ з породою; l – довжина леза різця по лінії контакту з ГП; V_{ps} , V_{mv} – швидкість поширення поздовжньої хвилі в матеріалі різця ПРІ та в ГП відповідно, α – кут пригострення леза різця ПРІ, ρ – щільність матеріалу різця ПРІ.

Визначити сумарні витрати енергії на руйнування ГП в одиницю часу (Вт/хв.) можна, виходячи з формули С.С. Сулакшина, що записується так:

$$A = 2\pi \cdot M \cdot F_{oc} \cdot n, \quad (6.17)$$

де M – крутний момент на ПРІ, Н·м; F_{oc} – значення осевого зусилля для застосованого ПРІ, Н; n – кількість обертів ПРІ, хв⁻¹.

З викладеного вище видно, що витрати енергії при руйнуванні визначаються геометричними параметрами ПРІ (6.16) і параметрами руйнування (6.17). Для точного розв'язання задачі оптимізації процесів буріння свердловин можуть бути застосовані енергетичні характеристики процесу руйнування ГП.

Енергоємність процесу руйнування ГП, будучи багатофакторним показником, дозволяє більш повно оцінити цикл спорудження свердловин, ніж порівняння за однією з фізико-механічних характеристик ГП.

У конструкції бурового снаряда з ефектом механічного руйнування ГП здійснена комбінація способів буріння [86]. Один з них – це так званий ударно-дробовий або кулеструминний, а інший класичний дробовий спосіб буріння (з деякими, багато в чому принциповими, змінами в конструкції самого ПРІ і вибійних процесів), який раніше широко застосовувався у практиці геологорозвідувальних робіт, але згодом був витіснений більш ефективним (за окремими показниками) алмазним бурінням. Однак за дробовим способом залишилася одна з його головних переваг – це низька вартість ПРІ (порівняно з твердосплавним та алмазним) та самого дробу, а також простота їх виготовлення.

Важливо й те, що заміну породоруйнівних «елементів» (дробу) можна проводити без підйому всього БС, простим його вкиданням через гирло свердловини, чим, серед іншого, досягається скорочення часу на СПО.

Для подальшого обґрунтування технологічних параметрів процесу буріння проєктованими БС, необхідно отримати адекватну модель взаємодії породоруйнівного кільця, що містить дробинки з ГП [87]. Це можна здійснити, розглянувши якісну сторону означених вибійних процесів.

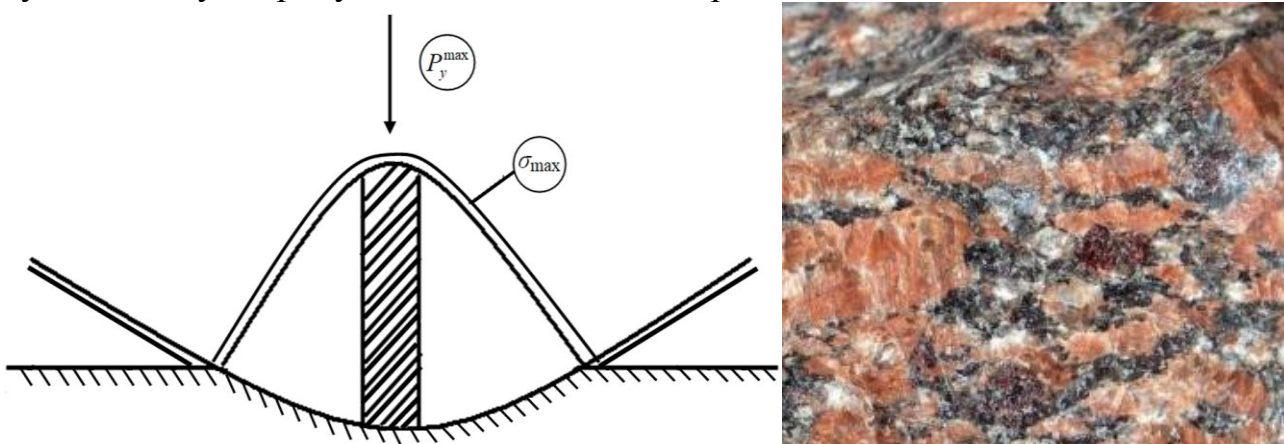


Рис. 6.3. Розподіл напруги на поверхні контакту під тиском максимального осевого зусилля P_y^{max}

Хоча в роботі кільця і використані деякі принципи дробового буріння, проте просте перенесення закономірностей останнього на механізм взаємодії в парі «кільце - ГП» неможливе. Це пов'язано як з особливостями конструкції самого

породоруйнівного кільця, так і вибійними процесами руйнування власне гідромеханічним способом. Підкреслимо тут, що правильне та чітке уявлення про механізм руйнування ГП за допомогою кільця є необхідною умовою подальших техніко-технологічних розробок гідромеханічного буріння (ГМБ).

У цілому механізм руйнування ГП, що реалізується окремими кульками, розташованими у посадкових гніздах породоруйнівного кільця, при статичних і динамічних навантаженнях, можна розділити на кілька умовних стадій [60]. Насамперед, слід зазначити, що згідно з загальноприйнятими уявленнями Геруа, розподіл напруг у разі контакту плоскої поверхні зі сферою, матиме вигляд відображеної кривої, яка показана на рис. 6.3. Найбільшими вони будуть біля центру поверхні контакту, а до периферії вони знижуватимуться до нуля.

Нерівномірність реалізованих руйнівних напруг викликає в тілі (гірських порід) виникнення так званих дотичних напруг, які призведуть до дрібних сколів і зрушень (рис. 6.4, а). При збільшенні зовнішньої сили P_y поверхня контакту також зростатиме і виникне нова система тріщин, паралельно першим, а раніше утворені потраплять у зони з меншими можливостями для розвитку і загаснуть (рис. 6.4, б); крім того, в зоні контакту відбувається зминання матеріалу (гірських порід) під майданчиком зіткнення в об'ємі, близькому до такого у вигляді перекинутого конуса, основою якого служить майданчик контакту. Подальше збільшення тиску на кулю призведе до сколювання країв конуса і зминання в об'ємі, що тяжіє також до форми перекинутого конуса (рис. 6.4, в).

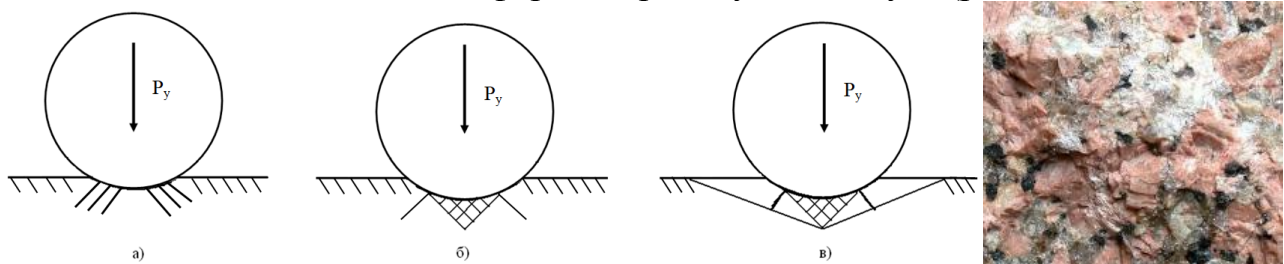


Рис. 6.4. Схема розвитку процесу руйнування ГП індентером, у формі кулі

Цілком очевидно, що вибій споруджуваної свердловини при кулеструминному бурінні не є монолітним; під натиском куль, які бомбардують його, він вже має той чи інший ступінь розвиненості тріщин, що, безумовно, призведе до деякого зниження величини необхідного осьового зусилля P_v^m , потрібного для ефективного руйнування за заданим механічним типом

$$P_y^m < P_y^{max}, \quad (6.18)$$

Величина прикладеного навантаження, що обумовлює ту чи іншу стадію руйнування, залежить в основному від фізико-механічних властивостей ГП та куль, а також геометричних розмірів останніх; проте їх розмір визначає тільки величину руйнівного навантаження та об'єм зруйнованої породи. Характер руйнування за різних розмірів куль залишається незмінним.

Динамічність вибійних процесів накладає свій відбиток на механізм руйнування ГП під торцем кільця. При перекочуванні кулі по поверхні вибою, руйнування породи починається при навантаженні, приблизно в два рази меншим за абсолютною величиною, ніж під нерухоною кулею. Це закономірне

зменшення руйнівного навантаження можна пояснити зміною умов розвитку напруженого стану ГП під кулею, що рухається на вибої свердловини.

У цілому розглядуваний спосіб буріння свердловин можна віднести до ряду комбінованих способів руйнування ГП, які характеризуються поєднанням в деяку технологічну групу засобів та прийомів відділення від гірського масиву і дроблення породи; такий комплексний спосіб відрізняється поєднанням різноманітних видів впливу на ділянку гірського масиву, наприклад, термічного і механічного, що складають комбінований термомеханічний спосіб руйнування.

Фізична сутність кожної стадії механізму руйнування ГП така. Перша стадія може мати місце тільки в межах пружних властивостей ГП, коли концентрація напруг на контурі тисків призводить до утворення місцевих тріщин або деякого розвитку вже існуючих. Поява тріщини по контуру тиску при навантаженнях, що не перевищують межу пружності ГП, обумовлена місцевою максимальною дотичною напругою на контурі тиску. Причому, на поверхні ГП після зняття навантаження немає залишкових деформацій, вона повністю відновлює початкову форму. Але на відновленій поверхні залишається макротріщина, що є наслідком місцевої концентрації напруг, а також попередніх ударів куль, розігнаних за допомогою струминного апарату. Друга стадія знаходиться за межею пружності ГП при навантаженні, що перевищує опір породи роздавлюванню. Розглядувана стадія характеризується зминанням ГП, що виявляється у руйнуванні кристалічних решіток в об'ємі конуса зминання; останнє обумовлено нерівномірним розподілом нормальних напруг під ділянкою зіткнення. Подальше збільшення навантаження на кулю призводить до збільшення тиску на зім'яту ГП, що є дрібним порошком. Отже, поширення тиску в об'ємі зім'ятої ГП буде аналогічно поширенню тиску в сипучих тілах, іншими словами підкоряться законам взаємодії в рідині. Внаслідок того, що величина зусилля в об'ємі зім'ятої породи поширюється рівномірно, відбувається пропорційне зростання тиску на поверхню конуса зминання, а ця обставина сприяє локальному збільшенню нормальних і дотичних напруг в зоні знаходження ГП, прилеглої до конуса зминання. Коли дотичні напруги перевищать опір ГП сколюванню, відбудеться зріз частини породного масиву. Третя стадія, є, власне, саме руйнуванням, що виражається відділенням об'єму сколювання по твірній конуса, є наслідком перевищення дотичними напругами опору гірської породи сколювання [88].

Наведений детальний аналіз деяких основоположних факторів руйнування ГП під торцем кільця удосконаленого кулеструминного снаряда дозволяє зробити важливий висновок. Умови, створювані в парі «породоруйнівне кільце - вибій свердловини» є досить ефективними з позицій суттєвої раціоналізації механізму руйнування і істотного зниження його енергоємності.

Розглянемо тут методологічні підходи до питань вивчення енергоємності процесу руйнування ГП в повітряному середовищі. Ряд прецензійних дослідів щодо вивчення окремих характеристик явища руйнування ГП відривом елемента породи від масиву проводилася на вапняку, мармурі та граніті (табл. 6.4).

При моделюванні складних процесів відриву деякого елемента від зразка породи в ньому утворюється конусоподібне заглиблення із основою діаметром

D , розташоване на поверхні зразка; рис. 6.5 ілюструє перерізи відірваного елемента у вертикальній площині для випробуваних матеріалів.

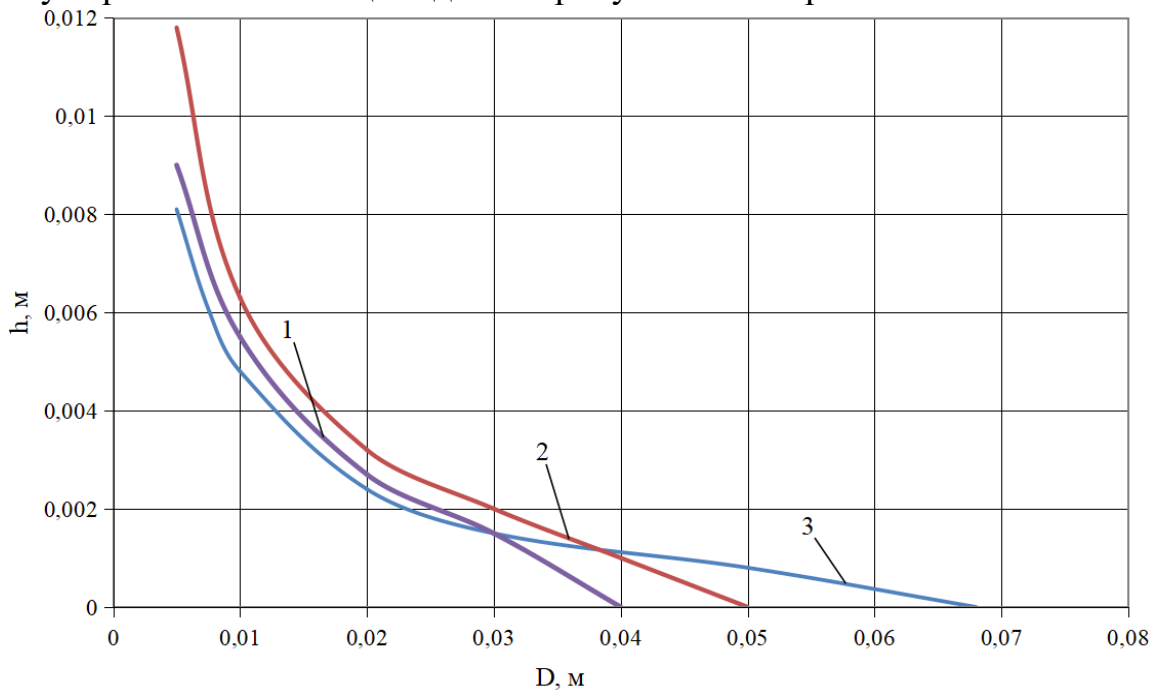


Рис. 6.5. Профіль елемента ГП, що знову утворюється, при відриві його від масиву (повітряне середовище): 1 – вапняк; 2 – мармур; 3 – граніт

Як показали проведені дослідження, знову утворена поверхня руйнування має неоднорідний вигляд, що пов'язано з анізотропією матеріалу (в даному випадку ГП), наявністю мікроскопічних тріщин та інших дефектів (рис. 6.6 - 6.8).

Характер експериментально отриманих кривих «навантаження - деформація» мало залежить від типу досліджуваних ГП. Як у щільних ГП (граніт, мармур), так і в пористих (вапняк), пружна деформація практично (5 - 10% від повної) закінчується руйнуванням, не переходячи в пластичну [14].

Значення $D_{перед}$ (більший діаметр основи зразка ГП) та $H_{перед}$ (висота відділеного елемента) отримано експериментально, величина зусилля відриву – за показаннями приладу УМГП-3 (табл. 6.4). Аналіз вказаних даних показує, що зростання зусилля відриву до максимального свого значення відбувається з постійною швидкістю, яка зменшується перед відривом елемента ГП.

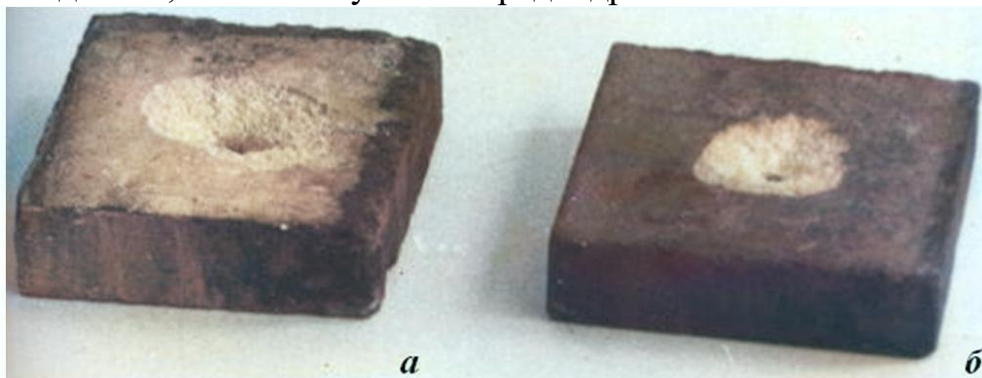


Рис. 6.6. Вигляд зразків вапняку після експерименту: а – повітряне середовище; б – водне середовище

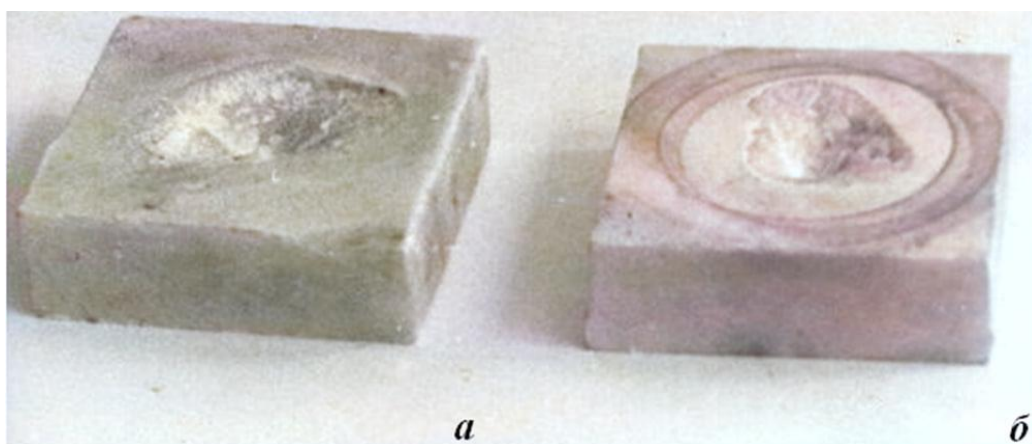


Рис. 6.7. Вигляд зразків мармуру після експерименту: *a* – повітряне середовище; *б* – водне середовище.

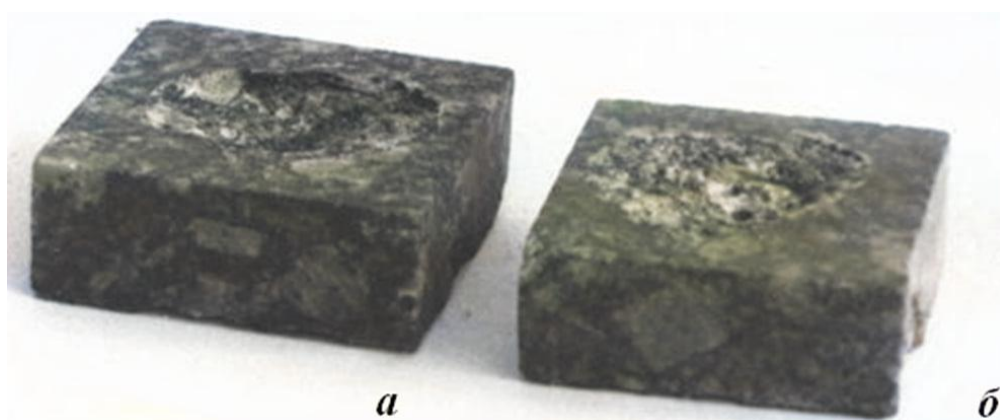


Рис. 6.8. Вигляд зразків граніту після експерименту: *a* – повітряне середовище; *б* – водне середовище.

Наступний цикл досліджень проводився за умов руйнування ГП у водному середовищі. При проведенні досліджень у водному середовищі перед випробуваннями зразки ГП були витримані у водопровідній воді протягом 48 годин для попереднього насичення пор порід водою. Надалі дослідження проводились за схемою, викладеною вище. Характер руйнування зразків такий самий, як і в повітрі: відокремлений елемент має вигляд усіченого конуса з бічною поверхнею, що описується криволінійною твірною (згідно даних Пащенко О.А.).

Енергоємність руйнування ГП на прикладі мармуру і граніту, при їх руйнуванні у водному середовищі, значно збільшується порівняно з раніше дослідженим повітряним, за винятком вапняку, енергоємність руйнування якого збільшується незначно, що, вочевидь, пов'язано з високою його пористістю (до 28%), насиченням пір останнього водою та розмоканням даної ГП.

Вкажемо наступне: зі збільшенням швидкості буріння зростає швидкість відділення частинок ГП від масиву. При цьому зростає різниця тисків між таким на вільну поверхню відокремленого елемента і знову утворену. Розглянута методика дозволила отримати дані про механізм впливу надлишкового тиску на

швидкість відокремлення елемента ГП від масиву, а також визначити залежність енергоємності процесу руйнування від швидкості навантаження елемента.

Зазначена фаза досліджень проводилася при декількох швидкостях руху пуансона (0,65; 1,11; 1,95 мм/с), по три дослідження на кожний зразок ГП.

Таблиця 6.4

Результати експериментальних досліджень процесів руйнування ГП у повітряному середовищі при тиску 0,1 МПа

Гірська порода	h, мм	d _п , мм	F ₀ , Н	D _{перед} , мм	D _{перед} сер., мм	H _{перед} сер., мм	[σ _p], Па ⁵	[σ _{ст}], Па ⁵	[τ], Па ⁵	Питомі енергозатрати a _{min} , (Н·м)/м ³	a _{min} сер., (Н·м)/м ³
Вапняк (E=14,5 ГПа)	10,5	5,7	928	41,8	39,7	9,4	6,89	50,56	27,45	1879,30	1489,53
	8,2		587	29,7			8,80	45,86	31,88	1792,64	
	9,6		749	43,2			5,20	39,43	23,41	1259,74	
	7,8		470	25,5			9,69	43,36	31,69	1581,37	
	8,4		676	39,8			5,55	38,75	26,30	1364,60	
	12,0		1014	58,1			3,86	39,38	18,71	1059,54	
Мрамур (E=29 ГПа)	12,4	5,7	2100	58,9	53,5	11,4	7,78	80,44	36,97	786,55	770,38
	10,8		1790	47,8			10,12	84,90	44,81	972,23	
	13,4		2030	62,6			6,65	73,08	31,09	605,83	
	9,8		1630	54,9			6,96	67,08	39,01	684,91	
	10,2		1450	39,1			12,34	84,68	47,32	980,50	
	11,6		1720	57,4			6,72	67,64	33,23	592,28	
Граніт (E=43 ГПа)	9,7	5,7	3940	96,3	68,2	8,2	5,43	91,76	53,92	2532,03	2354,05
	7,3		2230	53,8			9,93	93,69	73,15	3284,81	
	8,6		2350	73,4			5,59	71,99	47,71	1714,94	
	6,9		1960	54,5			8,50	81,26	67,13	2619,98	
	8,9		2420	72,1			6,97	75,48	48,34	1818,55	
	7,8		2040	59,1			7,51	77,87	56,90	2153,98	

На рис. 6.9 представлений таріювальний графік часу досягнення заданого навантаження 5000 Н у водному середовищі при тиску 0,1, 20 і 40 МПа. На рис. 6.10 та 6.11 показані залежності показників енергоємності при руйнуванні ГП у водному середовищі при різному зовнішньому ГС тиску від швидкості відриву.

Проведеними дослідженнями встановлено невеликі зміни у кількісних результатах статичного та динамічного відриву елементів ГП при малих швидкостях руйнування. Очевидним є зростання показників енергоємності зі збільшенням швидкості відриву елемента від зразка ГП (табл. 6.5 - 6.6).

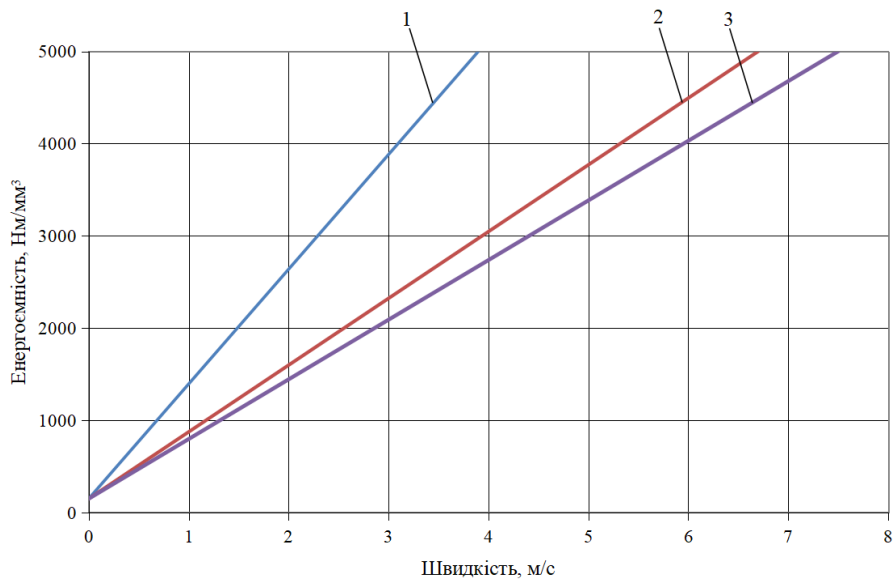


Рис. 6.9. Час досягнення заданого навантаження: 1, 2, 3 – у водному середовищі при тисках 0,1; 20 та 40 МПа відповідно.

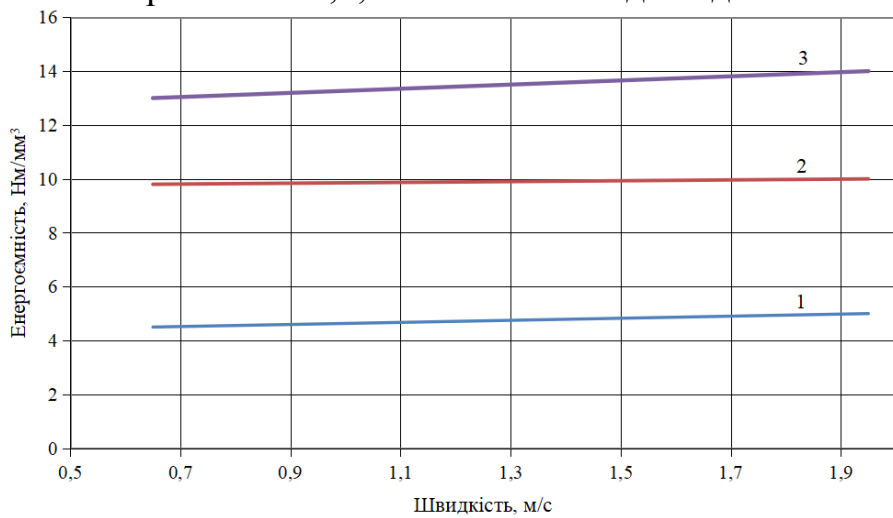


Рис. 6.10. Залежність величини енергоємності від швидкості деформування ГП у водному середовищі при ГС тиску 0,1 МПа: 1 – вапняк; 2 – мармур; 3 – граніт.

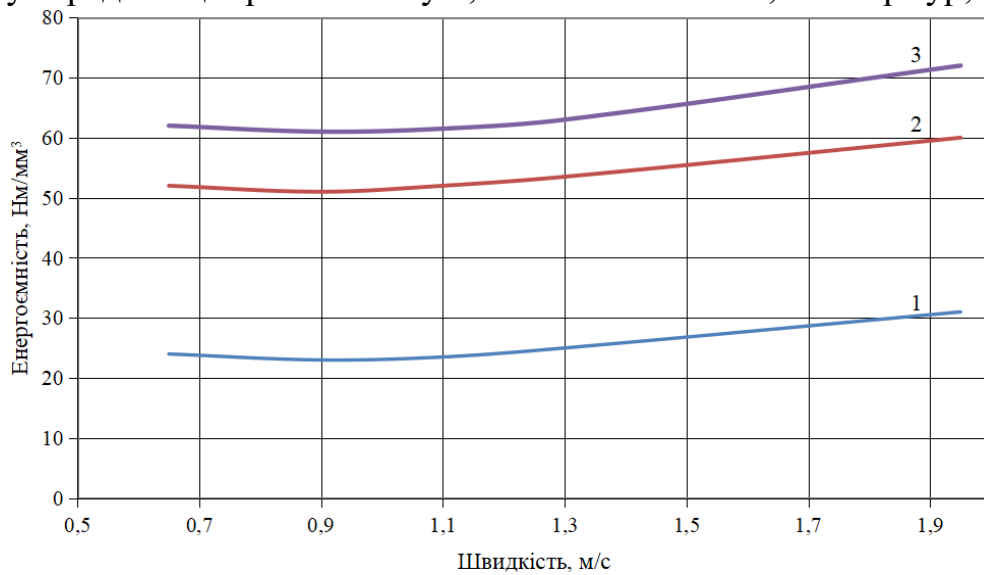


Рис. 6.11. Залежність величини енергоємності від швидкості деформування у водному середовищі при ГС тиску 40 МПа: 1 – вапняк; 2 – мармур; 3 – граніт.

Таблиця 6.5

Результати досліджень впливу швидкості навантаження на зусилля відриву

ГП	Швидкість переміщення пуансона V_p , мм/с	Величина ГС тиску складає 0,1 МПа				
		Зусилля відриву F_0 , Н	Середнє зусилля відриву F_{0cp} , Н	Площа $S_{відр}$, мм ²	Середня площа $S_{відр}$, мм ²	Енергоємність, Дж/м ³
Вапняк	0,65	480	490	106,7	108,9	450
		430		95,6		
		550		122,2		
	1,11	515	505	109,6	107,4	470
		505		107,4		
		490		104,3		
	1,95	535	535	104,9	104,9	510
		525		102,9		
		545		106,9		
Мармур	0,65	2540	2760	196,9	214,0	1290
		2750		213,2		
		2990		231,8		
	1,11	2450	2550	187,0	194,7	1310
		2720		207,6		
		2480		189,3		
	1,95	2590	2560	187,7	185,5	1380
		2580		187,0		
		2510		181,9		
Граніт	0,65	2690	2610	269,1	970	970
		2650				
		2490				
	1,11	2410	2595	245,9	264,8	980
		2595		264,8		
		2775		283,2		
	1,95	2565	2565	259,1	259,1	990
		2530		255,6		
		2595		262,1		

Таблиця 6.6

Результати досліджень впливу швидкості навантаження на зусилля відриву

ГП	Швидкість переміщення пуансона V_p , мм/с	Величина ГС тиску складає 40 МПа				
		Зусилля відриву F_0 , Н	Середнє зусилля відриву F_{0cp} , Н	Площа $S_{відр}$, мм ²	Середня площа $S_{відр}$, мм ²	Енергоємність, Дж/м ³
Вапняк	0,65	970	950	40,6	39,7	2320
		930		38,9		
		950		39,7		
	1,11	1015	960	43,8	41,4	2390
		965		41,6		
		930		40,1		
	1,95	935	980	30,1	31,5	3110
		1040		33,4		
		965		31,0		

Продовження табл. 6.6

ГП	Швидкість переміщення пуансона $V_{п}$, мм/с	Величина ГС тиску складає 40 МПа				
		Зусилля відриву F_0 , Н	Середнє зусилля відриву $F_{0ср}$, Н	Площа $S_{відр}$, мм ²	Середня площа $S_{відр}$, мм ²	Енергоємність, Дж/м ³
Мармур	0,65	2260	2750	36,9	44,1	6120
		2390		39,1		
		2310		37,7		
	1,11	2750	2790	44,1	38,6	6230
		2630		42,2		
		2870		46,1		
1,95	2890	2320	40,0	37,9	7230	
	2870		39,7			
	2610		36,1			
Граніт	0,65	2660	2590	52,1	71,4	5110
		2620		51,3		
		2490		48,7		
	1,11	4110	3670	80,0	50,7	5140
		3575		69,6		
		3325		64,7		
	1,95	2855	2780	47,2	46,5	5980
		2800		46,8		
		2715		45,4		

Вибрані швидкості $V_{п}$ нижче таких, характерних для ПРІ (1 - 2 м/с), що пов'язано з умовами проведення експерименту за розробленою методикою.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 6

1. Детально висвітлені загальні питання фізики руйнування порід та, зокрема, ті, які стосуються абразивно-механічного ударного способу буріння.
2. Аналітично вивчені методи дослідження процесу руйнування гірських порід та його енергоємності, на підставі чого сформульовані теоретичні основи роботи механічного породоруйнівного органу проєктованих пристроїв з обґрунтуванням механізму формування вибою споруджуваної свердловини.
3. Визначено основні параметри процесу руйнування гірських порід у повітряному та водному середовищах при активному впливі зовнішнього тиску.
4. Вивчено вплив швидкості навантаження на параметри руйнування.

РОЗДІЛ 7. ДЕЯКІ АСПЕКТИ АБРАЗИВНО-МЕХАНІЧНОГО УДАРНОГО БУРІННЯ В УМОВАХ ДІЇ ГІДРОСТАТИЧНОГО ТИСКУ

7.1 Вивчення теоретичних основ процесу абразивно-механічного руйнування гірських порід відповідними буровими снарядами

Основні закономірності процесу руйнування ГП при роботі кільця проектного кулеструминного снаряда з ефектом механічного руйнування [88], можна встановити, вивчаючи елементарний акт механізму руйнування однією кулею.

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 плоскість 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 [14].

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

$$p = \sigma_e \cdot F, \quad (7.1)$$

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

В якості орієнтовного значення параметру σ_e можуть бути без помітних похибок узяті величини твердості ГП $\sigma_{\sigma 0}$, визначені за відомим методом Л.А. Шрейнера [60] з урахуванням коефіцієнту динамічності, тобто

$$\sigma_e = \frac{\sigma_{\sigma 0}}{\beta}, \quad (7.2)$$

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.

$$d = 1,1443 \sqrt{4 Pr \left(\frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \right)}, \quad (7.3)$$

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» вибійної 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 конуса 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. 7.1). 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.

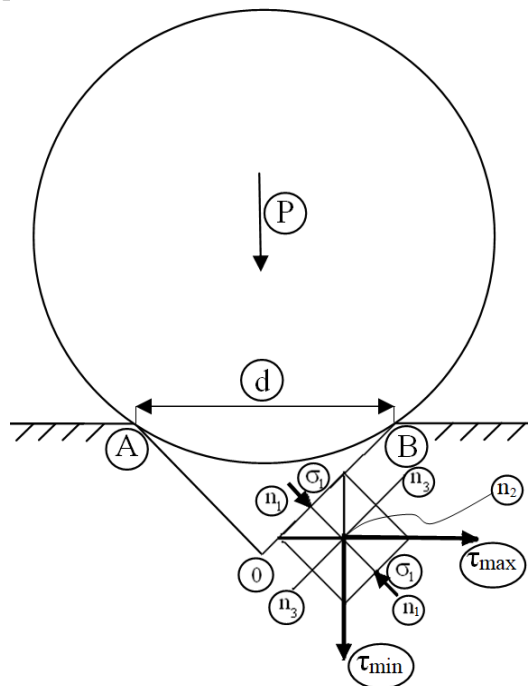


Рис. 7.1. Орієнтовна розрахункова схема для визначення навантаження на кулю, що забезпечує режим сколювання ГП

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 [81].

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

$$\tau = \frac{\sigma_1}{2} \sin 2\theta \quad (7.4)$$

Дані рис. 7.1 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

$$\tau_{max} \geq \tau_{скол} \quad (7.5)$$

інакше кажучи, сколювання інструментом породи відбудеться тоді, коли величина $\tau_{скол}$ 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 [56]. Різні місцеві ослаблення ГП також призводять до часткових виколів. Деяке стиснення ГП безпосередньо кулею, що прилягає до точок А і В (рис. 7.1), 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

$$\sigma_1 = \sigma_k = \frac{P_2}{F}, \quad (7.6)$$

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 мо-

мент 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

$$P_2 = \sigma_1 F = 2\tau_{\text{скл}} F. \quad (7.7)$$

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 різномірних уламків на вибої свердловини, що є результатом розколювання куль і відокремлення від масиву продуктів руйнування [90]. 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 виколування і деяке спресовування ча-

стинок 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 кромek 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.

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 перпендикулярно до проєкції вектора швидкості просування.

Під торцем матриці снаряда перебуватиме велика кількість абразивних частинок [81], 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 порожнеч 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]

$$\frac{dx}{dt} = K_1(Q - x), \quad (7.8)$$

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

$$K_I = \sigma_{кр} / \mu_F, \quad (7.9)$$

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

$$\mu_F = \frac{mv}{F}, \quad (7.10)$$

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

$$G = \int_S q dS, \quad (7.11)$$

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

Тут

$$q = \sum_{i=1}^N q_i, \quad (7.12)$$

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 [56], 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 ре-

льєфу 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. За класифікацією, представленою в роботі [91], 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 носитимуть 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 [92].

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

абразивного 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 – малоімовірні [93].

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.

7.2 Деякі положення методики визначення впливу гідростатичного тиску на ефективність руйнування гірських порід

Відповідно до прийнятого критерію – енергоємності відділення деякого елемента від масиву ГП, розроблено методику експериментальних досліджень руйнування при відриві елемента породи від досліджуваного зразка. Раніше, аналітично-практичним шляхом, було сформульовано основні вимоги до методичної послідовності експериментальних способів встановлення показників гірничо-технологічних властивостей ГП, які зводяться до наступного:

- результати здійснюваних випробувань повинні стійко корелюватися з визначуваними (насамперед з головними) показниками одного або кількох певних процесів руйнування, що здійснюються в натурних умовах;
- при побудові послідовної схеми проведення випробування на тих самих об'єктах результати повинні бути можливо більш подібними;

- при проведенні випробувань на різних об'єктах, суттєво різних за досліджуваними властивостями, отримані результати повинні бути суттєво різними;
- спосіб випробувань повинен бути простим (не вимагати складного, громіздкого, дорогого або дефіцитного обладнання, високої кваліфікації виконавців), нетрудомістким, за можливості швидким і за сукупністю всіх зазначених якостей доступним і зручним для широкого (масового) застосування на відповідних підприємствах. Відносно невисока точність нескладних приладів зазвичай може бути з надлишком компенсована збільшенням кількості досліджень.

Дослідження елементарного акту процесу руйнування [40] показали, що під час руху породоруйнівного елемента по поверхні вибою, зі швидкістю різання $V_{об}$ і механічною швидкістю буріння V_m , під його передньою гранню утворюється навантажений об'єм породи (за рахунок дії осьової $F_{ос}$ і обертаючої $F_{об}$ сил), який називається ядром ущільнення. Порода в ядрі ущільнення знаходиться в стані стиснення, достатньо ущільнена, може бути диспергована та передає навантаження $F_{відр}$ на масив ГП, що її оточує (рис. 7.2). При цьому, ядро ущільнення, розширюючись, здійснює роботу з відриву елемента ГП із зусиллям відриву, що становить 2 - 5% від величини зусилля на породоруйнівний елемент. Відрив елемента породи від масиву відбувається при утворенні тріщини, тиск в якій дорівнює нулю. Розкриттю тріщини перешкоджає гідростатичний тиск $P_{гидр}$, який створює навантаження, що протидіє відокремленню частини ГП. Після відриву елемента ГП, породоруйнівний елемент рухається деякий час, не зустрічаючи опору породи, при цьому зусилля різання падає майже до нуля, потім породоруйнівний елемент «набігає» на масив ГП, починає знову деформувати породу, створюючи ядро ущільнення, яке відокремлює наступний елемент, і процес руйнування повторюється циклічно [39].

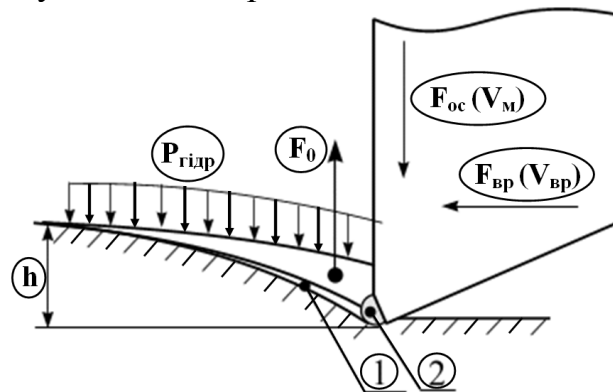


Рис. 7.2. Принципова схема руйнування ГП на вибої споруджуваної свердловини при дії гідростатичного тиску: h – поглиблення породоруйнівного елемента; $P_{гидр}$ – гідростатичний тиск; $F_{відр}$ – зусилля відриву; $F_{ос}$, V_m – осьове зусилля і механічна швидкість буріння відповідно; $F_{об}$, $V_{об}$ – зусилля і швидкість обертання; 1 – тріщина; 2 – ядро ущільнення

Оскільки гідростатичний тиск впливає на відокремлення елемента ГП від масиву, для визначення характеристичних ознак цього впливу необхідно, за можливості, виключити явище наявності витрат енергії на утворення ядра ущільнення, тертя породоруйнівного елемента об породу і т.д.

При виборі методики визначення ефективності руйнування ГП необхідно враховувати сутність і наслідки фізичних процесів, що відбуваються при руйнуванні в умовах дії гідростатичного тиску. В основі розглядуваної моделі лежить ідея, що при руйнуванні відбувається відрив від масиву деякого елемента ГП, оскільки це найменш енергоємний метод. На рис. 7.2 показаний процес відокремлення елемента ГП від масиву по криволінійній твірній. При цьому, в розглядуваному випадку, на процес руйнування впливає зовнішнє середовище, основними параметрами якого є гідростатичний тиск і в'язкість.

Враховуючи вищевикладене, необхідно змоделювати процеси об'ємного руйнування ГП з різними фізико-механічними властивостями в умовах гідростатичного тиску [94]. Для цього було запропоновано використовувати методику визначення міцності ГП за параметрами руйнування відривом, основою якої є положення, що гласить: при будь-якому механічному руйнуванні, наприклад при бурінні, від масиву відокремлюється за допомогою відриву деякий об'єм ГП. Руйнування відбувається за рахунок утворення та розвитку тріщини, яка виникає внаслідок перевищення величиною напруг у масиві деякої критичної величини. При цьому від масиву відокремлюється об'єм породи, який визначається її фізико-механічними властивостями, що знаходить своє відображення в параметрах і формі руйнування [95]. Пропонована методика дозволяє достатньо точно експериментально отримати данні щодо утворення поверхні руйнування.

Науковою основою методики є спосіб визначення характеристик міцності ГП за параметрами руйнування відривом [40]. Сутність випробовування зразків полягає в руйнуванні ГП пуансоном, що рухається у бік вільної поверхні досліджуваного зразка породи (рис. 7.3). Переваги даної методики полягають у тому, що по суті, для відриву, використовуються стискаючі навантаження. Відрив елемента ГП відбувається не по обробленій поверхні, як це реалізується при звичайному розтягуванні зразка, а по внутрішньому об'єму.

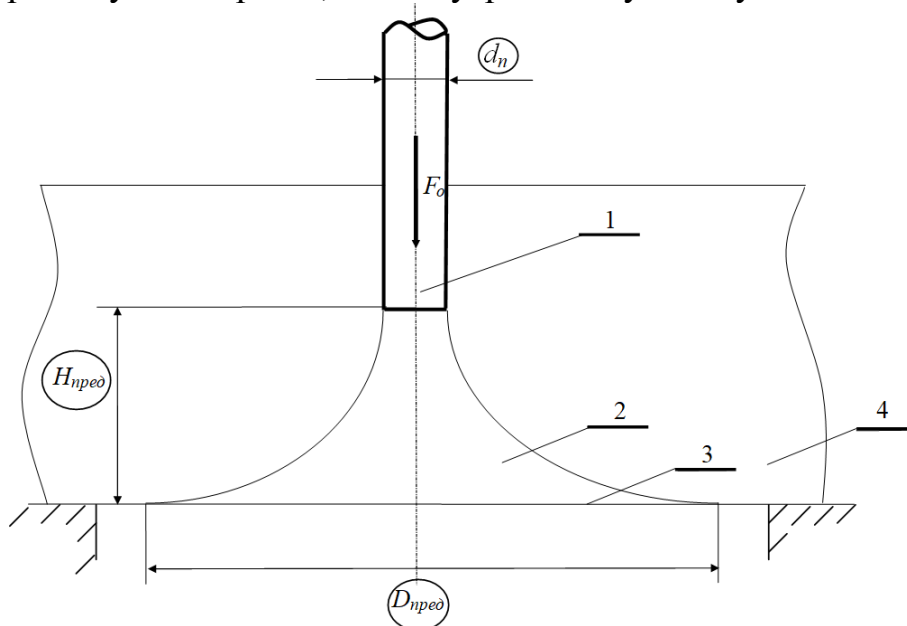


Рис. 7.3. Схема руйнування ГП методом відриву: 1 – пуансон; 2 – елемент ГП, що відділяється; 3 – вільна поверхня породи; 4 – зразок ГП

Дамо короткий опис методики досліджень (за Пащенко О.А.). Пуансон створює стискаюче навантаження на вибій заздалегідь підготовленого отвору в зразку ГП. Висота відокремлюваного елемента завідомо повинна бути меншою за товщину випробуваного зразка, для чого проводяться попередні дослідження. Після встановлення критичної висоти відриву визначається глибина отвору, і обчислюється висота елемента ГП, що відокремлюється, для кожного обраного матеріалу. Зразок ГП встановлюється на кільцеву оправку з діаметром, вибраним так, щоб уникнути впливу крайових ефектів. Пуансон занурюється в отвір і навантажується, доки не відбудеться відрив елемента ГП. Відрив елемента відбувається в момент перевищення критичних значень напруг, створюваних у зразку. При цьому відбувається відділення великого елемента з криволінійною утворюючою, параметри якого пов'язані з величинами міцності ГП:

$$D_{ep} / d_n = C = [\sigma_{cm}] / [\sigma_p]; \quad (7.13)$$

$$H_{ep} / d_n = C_1 = [\sigma_{cm}] / [\tau]; \quad (7.14)$$

$$D_{ep} / H_{ep} = C_2 = [\tau] / [\sigma_p], \quad (7.15)$$

де $[\sigma_{cm}]$, $[\sigma_p]$, $[\tau]$ – межі міцності досліджуваної ГП на стискання, розтягування та зсув відповідно; $D_{пред}$ – більший діаметр основи зразка ГП; $H_{пред}$ – висота відділення елемента ГП; d_n – діаметр пуансона.

Таким чином можна підсумувати наступне: якщо відома одна з меж міцності, то за співвідношенням (7.13 - 7.15) можна визначити всі інші.

Раніше проведеними дослідженнями встановлено, що криволінійна, яка утворює відокремлюваний елемент є частиною еліпса, півосями якого слугують такі параметри руйнування ГП:

$$a = \frac{D_{пред} - d_n}{2}, \quad (7.16)$$

$$b = H_{пред}. \quad (7.17)$$

У відповідності із цим, можна записати наступне рівняння еліпса, яке матиме такий вигляд:

$$\frac{\left(x - \frac{D_{пред}}{2}\right)^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1. \quad (7.18)$$

Розв'язуючи приведені рівняння відносно x , отримаємо:

$$x = \frac{D_{пред}}{2} + a \cdot \sqrt{1 - \frac{y^2}{b^2}}. \quad (7.19)$$

Перетворимо рівняння (7.19) в наступний вигляд:

$$x = \frac{D_{пред}}{2} + \frac{D_{пред} - d_n}{2} \cdot \sqrt{1 - \frac{y^2}{H_{пред}^2}}. \quad (7.20)$$

Аналогічно до викладеного, рівнянням еліпса описується крива, що виражає залежність розмірів великих основ D , елементів, (рис. 7.3) що відокремлюються від масиву ГП, з висотою відділення H .

У цьому випадку еліптична крива вписується у прямокутник зі сторонами $H_{перед}$ і $(D_{перед} - d_n)$, причому сторони прямокутника є півосями еліпса, рівняння якого в прямокутних координатах має такий вигляд:

$$\frac{(h - H_{перед})^2}{H_{перед}^2} + \frac{(D - d_n)^2}{(D_{перед} - d_n)^2} = 1, \quad (7.21)$$

де D – діаметр більшої основи елемента ГП, відокремленого з глибини h .

Розв’язуючи вказане рівняння відносно D , отримаємо:

$$D = d_n + (D_{перед} - d_n) \sqrt{1 - \frac{(h - H_{перед})^2}{H_{перед}^2}}. \quad (7.22)$$

Продовжуючи наші математичні викладки та розв’язуючи зазначені рівняння для експериментально отриманих значень D і h , можна визначити максимальні параметри елемента ГП, що відокремлюється $D_{перед}$ і $H_{перед}$, а за останніми, використовуючи формули (7.13 - 7.15), визначити коефіцієнти C , C_1 , C_2 :

$$\begin{aligned} C &= \frac{D_{перед}}{d_n}; \\ C_1 &= \frac{1 - \frac{y^2}{H_{перед}^2}}{d_n}; \\ C_2 &= \frac{D_{перед}}{H_{перед}}. \end{aligned} \quad (7.23)$$

Також за наведеними співвідношеннями можна визначити межі міцності досліджуваних зразків ГП:

$$\begin{aligned} [\sigma_{cm}] &= C \cdot [\sigma_p]; \\ [\sigma_{cm}] &= C_1 \cdot [\tau]; \\ [\tau] &= C_2 \cdot [\sigma_p]. \end{aligned} \quad (7.24)$$

Причому межа міцності ГП на розтягування $[\sigma_p]$ визначається за такою формулою

$$[\sigma_p] = \frac{4F_o}{\pi(D_{перед}^2 - d_n^2)}, \quad (7.25)$$

де F_o – навантаження на пуансоні в момент відриву елемента ГП.

Особливістю запропонованої методики є те, що усі деформаційні і міцнісні характеристики ГП визначаються з мінімальними витратами часу і є доволі нескладними. Оскільки характеристики міцності ГП не можуть дати повної картини впливу ГС тиску на процес руйнування ГП, було запропоновано на основі наведеної методики визначати роботу, що витрачається на руйнування при різних значеннях для діючого ГС тиску.

Робота руйнування, віднесена до площі здавлюваного штампу, або об’єму лунки, дає, відповідно, значення питомої контактної або об’ємної роботи руйнування, яка залежить від механічних властивостей ГП та величини лунки руйнування (найбільш повний показник опору породи руйнуванню).

До прикладу визначимо енергоємність відокремлення деякого об'єму породи від масиву для нашого способу руйнування. Для спрощення розрахункової схеми додатково оговоримо, що відокремлюваний від масиву елемент ГП являє собою усічений конус. Більша основа цього конуса прийнята за параметр $D_{перед}$, а менша відповідає діаметру пуансона d_n . Критичній висоті $H_{перед}$ елемента, що відділяється, відповідає мінімум енерговитрат.

Приблизно, з урахуванням прийнятих нами припущень, об'єм елемента, що відокремлюється, можна визначити як об'єм усіченого конуса заввишки $H_{перед}$ і діаметром основи $D_{перед}$ при діаметрі пуансона d_n :

$$V = \frac{\pi H_{перед} (D_{перед}^2 + D_{перед} d_n + d_n^2)}{12} \quad (7.26)$$

При дії на зразок ГП сили F робота, виконана цією силою, визначається наступним рівнянням (7.27). Враховуючи, що згідно із законом Гука [96], величина деформації прямо пропорційна нормальному напруженню $\varepsilon = \sigma/E$, запишемо

$$A = F_o \Delta h = F_o h \varepsilon = \frac{F_o h \sigma_p}{E}, \quad (7.27)$$

де Δh – абсолютна деформація; E – модуль Юнга досліджуваної породи; h – відносна деформація породи [81].

$$h = \frac{F_o}{\sigma_p d_n}. \quad (7.28)$$

Підставляючи значення h в наведене нами рівняння (7.27), отримаємо:

$$A = \frac{F_o^2}{E d_n}. \quad (7.29)$$

Для визначення енергоємності застосуємо наступний вираз

$$a_{\min} = \frac{F_o^2}{E d_n V} = \frac{12 F_o^2}{\pi H_{перед} E (D_{перед}^2 + D_{перед} d_n + d_n^2) d_n}. \quad (7.30)$$

Підрахунок числового еквіваленту навантаження на пуансон у момент відриву великого елемента ГП та визначення величини енергоємності може бути здійснено за такими формулами:

$$F_o = \frac{[\sigma_p] \pi (D_{перед}^2 - d_n^2)}{4}, \quad (7.31)$$

$$a_{\min} = \frac{3\pi [\sigma_p]^2 (D_{перед}^2 - d_n^2)}{4EH_{перед} d_n (D_{перед}^2 + D_{перед} d_n + d_n^2)}, \quad (7.32)$$

або ґрунтуючись на виразі (7.23) та підставляючи (7.13), можна записати:

$$a_{\min} = \frac{3\pi [\sigma_p]^2 \left(D_{перед}^2 - \frac{D_{перед}^2}{[\sigma_{cm}] / [\sigma_p]} \right)}{4EH_{перед} \frac{D_{перед}}{[\sigma_{cm}] / [\sigma_p]} \left(D_{перед}^2 + D_{перед} \frac{D_{перед}}{[\sigma_{cm}] / [\sigma_p]} + \frac{D_{перед}^2}{[\sigma_{cm}] / [\sigma_p]} \right)}. \quad (7.33)$$

Нескладно бачити, що з формули (7.33) випливає закономірне твердження: параметри руйнування пов'язані з фізико-механічними властивостями матеріалу [97]. Залежність зміни питомих енерговитрат a_{min} на руйнування від глибини відриву елемента показує, що граничній глибині відділення відповідає мінімум питомих енерговитрат незалежно від геометричних параметрів пуансона. Цей мінімум енерговитрат можна назвати енергетичною характеристикою опору руйнування твердих матеріалів (гірських порід) і є їх енергоємністю руйнування. Власне енергоємність – це кількість енергії, що потрібна на відокремлення від масиву даної одиниці об'єму, обумовлена фізичною природою матеріалу і характером руйнування. Таким чином, за допомогою запропонованої методики можна визначити енергоємність руйнування, яка не залежить від геометричних параметрів пуансона і є фізичною характеристикою матеріалу, що руйнується; за її величиною можна порівнювати різні ГП відносно їх опору руйнуванню і визначати ефективність різних способів руйнування.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 7

1. Наведено деякі аналітичні залежності, що визначають послідовність та етапи циклу формування периферійної частини вибою споруджуваної свердловини при абразивно-механічному ударному руйнуванні породи.
2. Детально сформульовані принципи та методи визначення впливу гідростатичного тиску на ефективність руйнування гірських порід.
3. Вивчено деякі принципові аспекти абразивно-механічного ударного буріння в умовах дії гідростатичного тиску.
4. Обґрунтовано інженерну методику розрахунку енергоємності руйнування породи та визначення характеру впливу на означений процес різних техніко-технологічних чинників.

8. ДОСЛІДЖЕННЯ ПОВЕРХНЕВИХ ТА ОБ'ЄМНИХ ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ЯВИЩ ПРИ ПРОТІКАННІ ЦИРКУЛЯЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ У СВЕРДЛОВИНІ

8.1 Об'єкт та методика проведення досліджень

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 [98]. Під дією зовнішніх сил ГП деформуються, таким чином проявляють пружні та пластичні властивості, а також ГП руйнуються [99]. 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. 8.1).

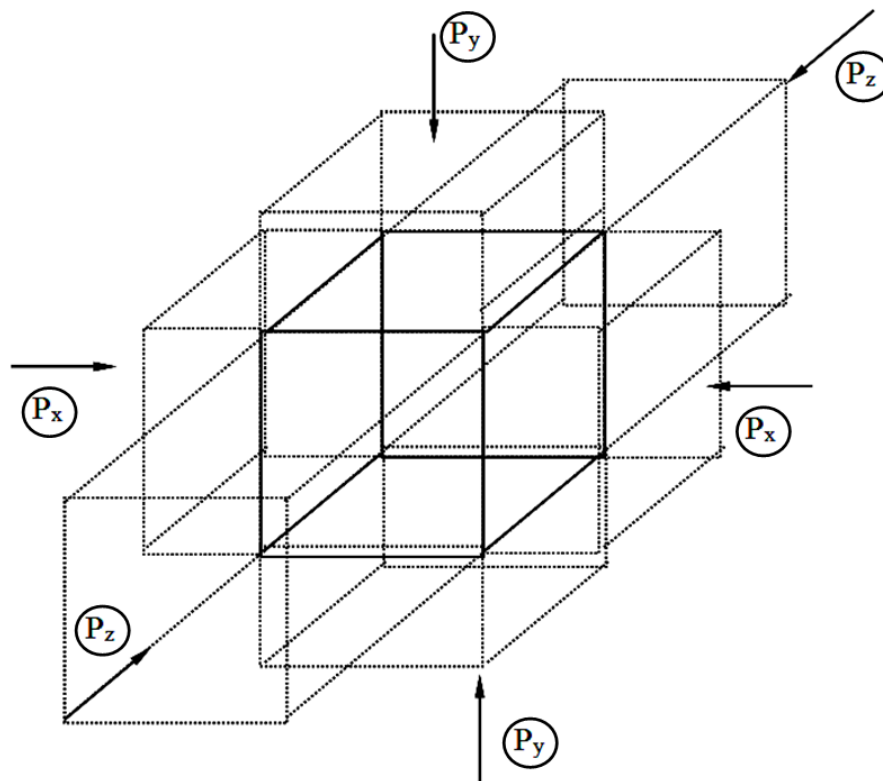


Рис.8.1. Схема, яка моделює умови всебічного стиснення зразка ГП

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 [100], 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. 8.1 [14].

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 [101]. 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 [102].

Таблиця 8.1

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 [103]. 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 відпові-

дних показників [14]. 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 підлеглими 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 [66].

8.2 Експериментально-теоретичні дослідження адсорбційної здатності гірських порід

Відомо, що 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 речовини. Поверхні мінералів часто незадовільно охарактеризовані, проте хімічні властивості поверхневих сполук можуть визначати характер адсорбції, тобто якого роду взаємодії матимуть місце. Взаємодія між поверхнею і адсорбованими речовинами може бути або хімічною, або фізичною, а визначити її можливо наступним чином [104]: хімічна адсорбція (хемосорбція), водневий зв'язок, гідрофільне зв'язування, вандерваальсові сили.

Важливими практичними характеристиками адсорбції є: а) швидкість адсорбції; б) форма ізотерми; с) наявність плато на багатьох ізотермах; д) ступінь

адсорбції розчинника; t) тип адсорбції – моношаровий або багат шаровий; f) орієнтація адсорбованих адсорбентом молекул; g) вплив температури; h) природа взаємодії між адсорбатом і адсорбентом.

Відносно вигляду початкової ділянки виділяють чотири класи ізотерм. Найбільш широким є клас *L*, або ленгмюровський тип адсорбції (рис. 8.2).

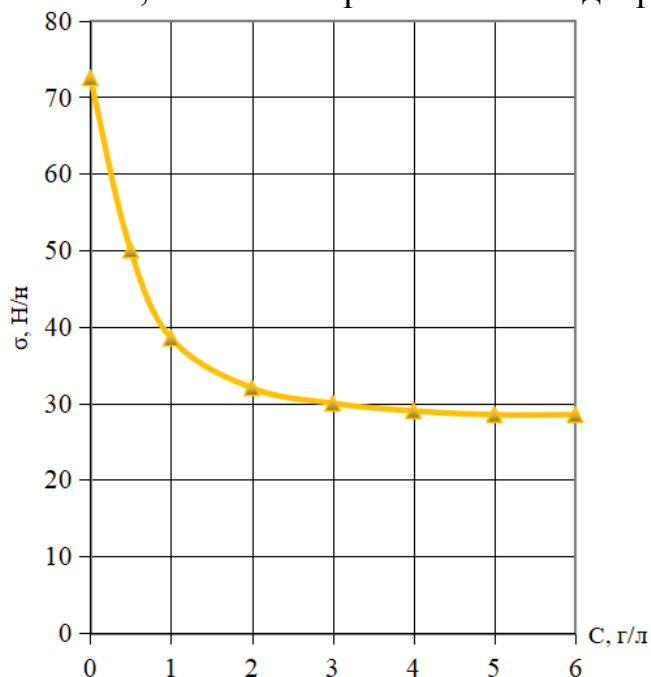


Рис. 8.2. Ізотерма поверхневого натягу водного розчину сульфонолу

Ізотерми адсорбції іоногенних ПАР часто носять ленгмюровський характер. Вони мають тенденцію досягати плато поблизу ККМ (критична концентрація міцелоутворення) даної ПАР (рис. 8.3).

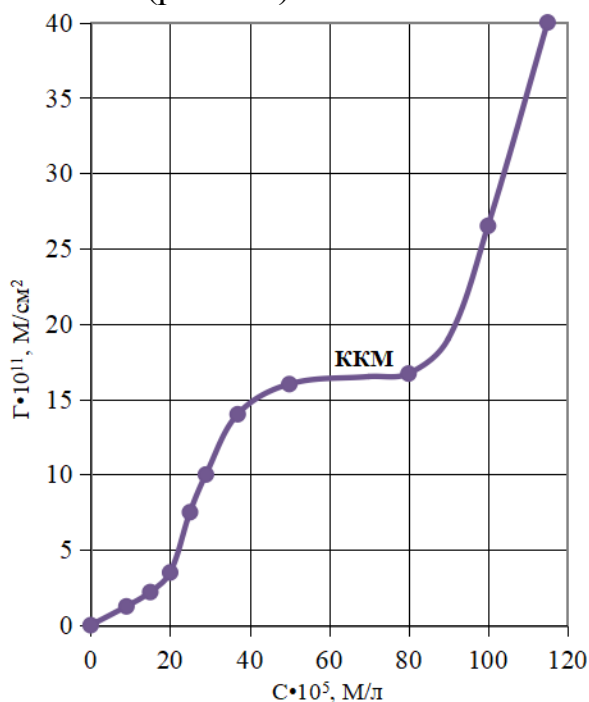


Рис. 8.3. Ізотерма адсорбції сульфонолу із розчину, приготовленого на дистильованій воді, на поверхні залізного кварциту

Багато вчених вважають, що величина адсорбції, яка досягається на плато, відповідає щільноупакованому моношару. Однак, детальна кількісна інтерпретація даних, отриманих при досягненні плато, дуже складна.

Отже, можна зробити висновок про те, що хоча і є безліч науково-дослідницьких робіт з вивчення механізму адсорбції, до теперішнього часу він вивчений не повністю [105]. Особливо це відноситься до адсорбції ПАР з водних розчинів на поверхні ГП, яке має місце при застосуванні активованих фізично і хімічно бурових ПР, а в іншій технологічній інтерпретації і спеціальних технологічних рідин, використовуваних в процесах закінчування та експлуатації різних типів свердловин.

Для розрахунків адсорбції використовують рівняння, яке отримують, припускаючи адсорбцію однієї речовини при низькій концентрації і виражаючи її хімічний потенціал в об'ємі μ_o^o через $\mu_o^o + RT \cdot \ln C$

$$\Gamma = -\frac{1}{RT} \frac{d\sigma}{d \cdot \ln C} = -\frac{C}{RT} \frac{d\sigma}{dC}, \quad (8.1)$$

де μ_o^o – стандартний потенціал.

Рівняння Фрумкіна пов'язує σ і Γ залежністю [73]

$$\sigma = \sigma_o + RT\Gamma_m \ln[1 - (\Gamma/\Gamma_m)]. \quad (8.2)$$

Наведені нами рівняння охоплюють всі можливі варіанти, і з їх допомогою можна обробляти експериментальні дані, тобто, маючи залежність від C , побудувати залежність Γ від C , але не можна, виходячи з будови молекул ПАР, розрахувати поверхневі властивості останніх.

Таким чином, за даними значень поверхневого натягу може бути розрахована адсорбція ПАР і оцінена її поверхнева активність, яка тим вище, чим більше адсорбційний потенціал. Для гомологічних рядів ПАР зв'язок між поверхневою активністю і довжиною вуглеводневого ланцюга встановлюється правилом Дюкло-Траубе. Згідно з цим правилом, поверхнева активність зростає приблизно в 3,2 рази при подовженні вуглеводневого ланцюга на одну метиленову групу, тобто при переході від n -го до $n + 1$ члену гомологічного ряду [106].

Адсорбцію ПАР з водних розчинів на поверхні залістистих кварцитів вивчали на порошках з розміром частинок від 0,2 до 2 мм. В якості рідких фаз були використані водні розчини міцелоутворюючих ПАР різної природи. Для вивчення адсорбції на твердій поверхні для кожного з них експериментально визначали оптимальне співвідношення між масою твердої фази і об'ємом розчину, а також час встановлення адсорбційної рівноваги. Величину адсорбції визначали за різницею концентрацій ПАР в розчині до і після встановлення адсорбційної рівноваги і розраховували за формулою

$$\Gamma = \frac{\Delta C \cdot V}{m}, \quad (8.3)$$

де ΔC – різниця концентрацій ПАР в розчині до і після адсорбції, V – об'єм розчину, m – навіска твердого адсорбенту.

Площу, що припадає на окрему молекулу в адсорбційному шарі, визначали за наступною формулою

$$S_1 = \frac{10^2 \cdot S}{\Gamma_m \cdot N_a}, \quad (8.4)$$

де Γ_m – деяке значення граничної адсорбції, N_a – число Авогадро, S – питома поверхня адсорбенту.

Концентрацію ПАР в розчині після адсорбції визначали за ізотермою поверхневого натягу, відокремивши дисперсну фазу центрифугуванням. Поверхневий натяг вимірювали методом Вільгельмі, сутність якого полягає в тому, що пластинка з алюмінієвої фольги наводиться в зіткнення з поверхнею рідини і вимірюється вага пластинки. Поверхневий натяг розраховується за різницею ваги сухої і змоченої пластинки, віднесеної до периметру пластинки

$$\sigma = \frac{P_2 - P_1}{2 \cdot d}, \quad (8.5)$$

де P_1 – вага досліджуваної пластинки на повітрі, P_2 – вага пластинки на межі розділу «рідина - газ», d – ширина пластинки.

Вагу пластинки визначали за допомогою торсіонних ваг з точністю 1 мг. Помилка у визначенні поверхневого натягу становила не більше 0,5 Н/м.

Із залежності $\sigma = f(c)$ були розраховані значення поверхневої активності, ККМ (критична концентрація міцелоутворення), адсорбції і площі, що припадає на одну молекулу в адсорбційному шарі на межі розділу «рідина - газ». У природних водах, які використовуються для приготування ПР і реагентів, часто містяться іони полівалентних металів. Для з'ясування рівня їх впливу на властивості ПАР, використовували фоновий електроліт CaCl_2 .

Розглянемо адсорбцію іоногенних ПАР на твердих поверхнях, що мають полярну природу. При цьому на поверхні твердого тіла виникає заряд, величина якого залежить від природи твердого тіла, хімічного складу і рН розчину. Він виникає або внаслідок гідролізу і виходу одного з іонів, які утворюють решітку даного тіла, в розчин, або внаслідок адсорбції на твердій поверхні одного з іонів розчину. Вимірювання електрофоретичної рухливості твердих частинок дозволяють отримати чисельні значення ζ -потенціалу, що є характеристикою поверхневого заряду. Оскільки система, в цілому, залишається електронейтральною, в розчині знаходиться однакове число іонів з рівними і протилежними за знаком зарядами. В такому випадку адсорбція іонів ПАР може протікати або через обмін з катіонами в подвійному шарі, або як спільна адсорбція противоіонів. Продовжимо розгляд механізму адсорбції ПАР і ролі електричних взаємодій при цьому процесі. Зазвичай, картину зміни енергії системи при адсорбції представляють у вигляді двох складових [107]:

$$\Delta G_{ads} = \Delta G_{elec} + \Delta G_{spec}, \quad (8.6)$$

де ΔG_{elec} – складова, що враховує електричні взаємодії; ΔG_{spec} – враховує специфічну адсорбцію і включає всі інші вклади у вільну енергію, що залежать від специфічних (неелектричних) взаємодій.

Руйнування ГП у водному середовищі супроводжується утворенням різниці тисків на вільну і на знову утворювану поверхню. Вона залежить від величини ГС тиску, швидкості відриву елемента від масиву, в'язкості рідини, її густини

ни і багатьох інших чинників. Робота інструменту у водному середовищі потребує певних витрат енергії на переміщення зруйнованої породи і подолання гідродинамічного опору руху самого інструменту [2].

Тиск на вибої свердловини обумовлений наявністю стовпа ПР, при цьому, якщо ПР знаходиться в нерухомому стані, тиск називається гідростатичним, якщо потік рідини знаходиться в русі, то тиск є гідродинамічним. Оскільки при бурінні свердловини циркулююча рідина повинна забезпечувати промивання свердловини, тобто переміщатися, то на вибій діятиме гідродинамічний тиск. У загальному випадку вплив тиску ПР чинить складну дію, він є комбінацією гідростатичного і гідродинамічного тисків. Деякі дослідники називають цей тиск пригноблюючим, тобто таким, що перешкоджає руйнуванню [55]. Такий термін узагальнює всі сторони негативної дії рідини у свердловині на процес буріння. Величина гідродинамічного тиску залежить від глибини свердловини, тобто ГС тиску, густини ПР і надлишкового тиску, що виникає в затрубному просторі через наявність місцевих гідравлічних опорів при циркуляції ПР і, у свою, чергу є залежним від напрямку, швидкості і характеру потоку рідини.

Нині майже відсутні методики з проектування технічних засобів і технологій проведення робіт за дії значного ГС тиску, а також недостатньо досліджені процеси, що протікають при руйнуванні ГП в означених умовах. Отже, вивчення основних деформаційних характеристик ГП в умовах дії ГС тиску дозволить виявити чинники, що впливають на енергоємність процесу руйнування і визначити параметри технічних засобів для проведення бурових робіт.

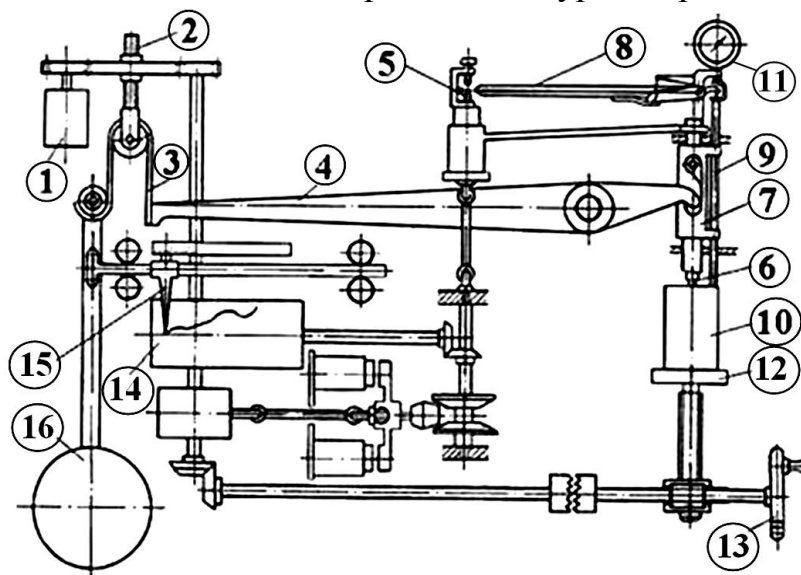


Рис. 8.4. Схема стенду для дослідження впливу ГС тиску на процес руйнування ГП: 1 – електродвигун; 2 – гвинт; 3 – стрічка; 4 – важіль; 5 – рухлива головка; 6 – штамп; 7 – шток; 8 – плече важіля; 9 – вимірювальна ніжка; 10 – досліджуваний зразок ГП; 11 – індикатор; 12 – столик; 13 – маховичок; 14 – барабан; 15 – записувальне перо; 16 – маятник

Механічні властивості вивчених зразків гірської породи визначалися за допомогою стенду для дослідження впливу ГС тиску на процес руйнування ГП, обладнаного: приладом УМП-3, індикаторами, барокамерою (рис. 8.4). В про-

цесі підготовки до проведення досліджень було проведено тарирування установки УМП-3 за допомогою динамометра ДОСМ-3-1 в діапазоні навантажень від 0 до 10000 Н. При проведенні досліджень, зразки ГП були випробувані в повітряному і водному середовищах при тисках до 10 МПа. При цьому вимірювалися і задавалися наступні параметри: висота відриву елементу, що відокремився; діаметр нижньої основи елементу, що відокремився; діаметр пуансона; зусилля відриву. Кількість випробовуваних зразків складала шість екземплярів для кожного виду ГП при проведенні досліджень в однотипному середовищі. Після визначення геометричних параметрів відокремленого елементу, розраховувалися відповідні характеристики порід і енергоємність його відриву.

Встановлено, що кожний зі способів руйнування є ефективним в певних ГП. Саме тому створення так званого універсального робочого органу для руйнування ГП в широкому діапазоні їх міцності і умов залягання, представляється надскладним і не вирішуваним завданням.

На руйнування витрачається енергія, причому, як правило, чим більше витрачено енергії, тим більший об'єм буде відокремлений від масиву. При будь-якому виді руйнування результати оцінюють питомими витратами енергії. Зрозуміло, з позиції енергозбереження кращим способом і оптимальним режимом створення свердловини необхідно вважати такий, який забезпечує мінімальну енергоємність. Тому, з точки зору скорочення витрат енергії, необхідно вибирати ПРІ і технологію руйнування так, щоб досягти мінімуму енергоємності руйнування. Останнє дає можливість врахувати вплив ГС тиску на основні показники характеристик міцності ГП, що визначають навантаження на робочий інструмент. Ефективність руйнування порід обертальним способом залежатиме від властивостей ГП, а також від технічних і технологічних чинників. Перераховані чинники зрештою визначають умови, в яких відбуваються процеси руйнування порід, формування стовбура свердловини і керна, викривлення свердловин і інші процеси [108]. Від них також залежить вибір найбільш раціонального способу буріння свердловин, типу (конструкції) вибійного інструменту, БС і режиму його роботи, і інші технологічні параметри і операції. Під час проведення досліджень з визначення характеру впливу перелічених чинників на механізм руйнування ГП у водному середовищі, перед випробуваннями зразки були витримані у водопровідній воді протягом 48 годин для насичення пор порід водою. Характер руйнування зразків залишився таким самим, як і в повітрі: відокремлений елемент має вигляд усіченого конуса з бічною поверхнею, яка описується криволінійною твірною. Енергоємність руйнування мармуру та граніту, при їх руйнуванні у водному середовищі, значно збільшилася в порівнянні з повітрям, за винятком вапняку, енергоємність руйнування якого збільшилася незначно, що, очевидно, пов'язано з високою пористістю (до 28%), насиченням пір останнього водою та, нарешті, розмокання.

Дослідження впливу ГС тиску на енергоємність руйнування ГП проводилися за тиску 10 МПа (відповідно до методики Пашенка О.А.). Використані породи, що у попередніх дослідах. Зростання ГС тиску відбувалося протягом 1,5 годин. Як видно з отриманих даних (рис. 8.5), швидкість навантаження зале-

жить від пружно-пластичних властивостей зразка і параметрів зовнішнього середовища, швидкість переміщення у всіх дослідженнях залишається постійною.

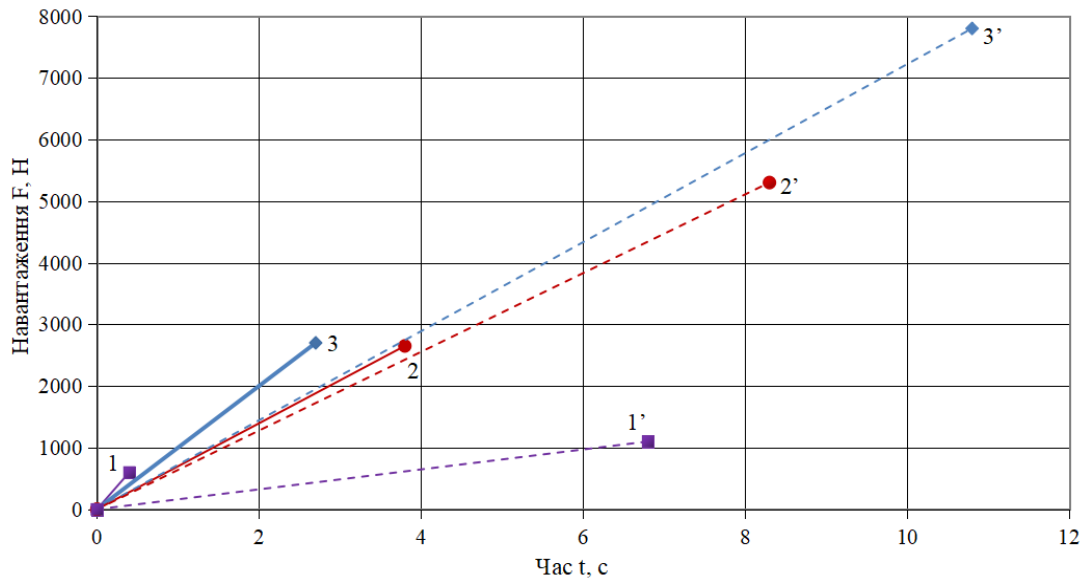


Рис. 8.5. Залежність величини навантаження на ГП від часу та ГС тиску: 1, 2, 3 – вапняк, мармур, граніт відповідно (тиск 0,1 МПа); 1', 2', 3' – вапняк, мармур, граніт відповідно (тиск 40 МПа)

Проведення експериментів у водному середовищі при ГС тиску показало, що характер руйнування ГП під тиском у водному середовищі змінюється мало. Відзначається зменшення нижньої основи конуса відриваного елемента. Причому, краї відокремленого під тиском елемента ГП, мають чітко виражений обривистий характер. Відзначається більше зростання енергоємності руйнування граніту в порівнянні з вапняком і мармуром, а також розмокання цих порід.

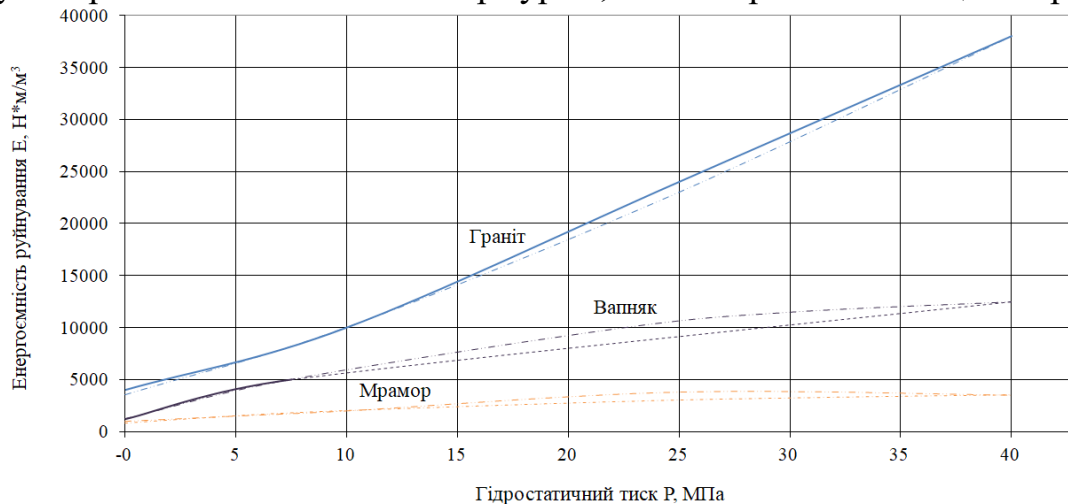


Рис. 8.6. Залежність енергоємності руйнування ГП від ГС тиску при відриві елемента

Деяке збільшення ГС тиску до 10 МПа привело до збільшення енергоємності руйнування ГП в порівнянні з 0,1 МПа: вапняку – 4,0 рази, мармуру – 3,7 рази, граніту – 2,7 рази. Збільшення ГС тиску до 40 МПа збільшило енергоємність руйнування в порівнянні з 0,1 МПа: вапняку – 5,3 рази, мармуру – 8,3 рази, гра-

ніту – 9,9 рази. В той же час, зусилля відриву F_0 із збільшенням ГС тиску до 40 МПа збільшилося для вапняку на 1,03 рази, мармуру – 2,08 рази, граніту – 3,95 рази (згідно даних Пащенко О.А.). На підставі отриманих експериментальних даних розраховані енергоємність руйнування випробовуваних ГП і визначений характер впливу ГС тиску на параметри руйнування (рис. 8.6).

Руйнування твердого тіла завжди полягає в поступовому розвитку нових поверхонь розділу з навколишнім середовищем, і величина вільної поверхневої енергії тіла, що руйнується, в основному визначає роботу поділу твердого тіла на частини – роботу диспергування як міру твердості. З іншого боку, з термодинаміки відомо, що позитивна адсорбція речовини, введеної в навколишнє середовище, тобто концентрація її молекул поблизу поверхні, завжди супроводжується відповідним зниженням вільної поверхневої енергії [109].

Адсорбційне зниження твердості відбувається внаслідок підвищення спорідненості ГП і ПР. Це проявляється в інтенсивному зв'язуванні водних (гідратних) оболонок на внутрішній поверхні мікрощілин або їх устях. Утворення водних оболонок на поверхнях твердого тіла і зміна їх товщини може відбуватися при зміні концентрації позитивно або негативно заряджених іонів (іони водню H^+ та гідроксилу OH^-), які можуть адсорбуватися на поверхні твердого тіла з утворенням так званого подвійного електричного шару. Такий шар складається з двох частин: адсорбційного, пов'язаного з поверхнею, і рухомого – дифузного. Падіння електричного потенціалу в дифузійній частині подвійного шару, тобто різниці потенціалів між нерухомим адсорбційним шаром і зовнішньою межею дифузійної оболонки, є електрокінетичним потенціалом твердої поверхні в даній рідині і характеризує її заряд. При малих концентраціях дисоційованих іонів нерухомий адсорбційний шар насичений. Підвищення концентрації іонів в рідині викликає адсорбцію їх з однойменно зарядженими іонами адсорбційного шару. При цьому відбувається перехід відповідної кількості протиіонів з рідини в дифузний шар. Цей процес супроводжується збільшенням електрокінетичного потенціалу поверхні твердого тіла.

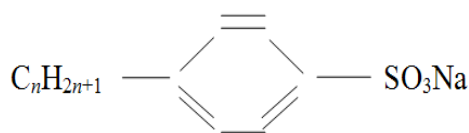
Науково і практично доведеним є наступне: пониження міцності твердих тіл може бути досягнуто за рахунок зменшення їх поверхневої енергії у спосіб, що ґрунтується на адсорбційній взаємодії контактуючих фаз. Вказана взаємодія може носити ознаки фізичного, хімічного або комплексного характеру; причому, у вказаних умовах, відбувається виникнення явищ знеміцнення, появи хрупкості, зменшення довговічності, зниження пластичності.

Найбільш показовим методом дослідження адсорбційних явищ на межі розділу фаз є вивчення ізотерм адсорбції, що дають уяву про поверхневу активність даної речовини з огляду на її концентрацію в розчині C і рівень зниження поверхневої енергії σ (для водних розчинів ПАР зазначений параметр носить назву – поверхневе натягнення) [110], та, окрім зазначеного, дозволяють аналізувати відповідні властивості твердого тіла у відношенні величини адсорбції Γ ; для розрахунку параметрів останньої можливе використання рівнянь, що отримані з припущення наявності адсорбції та вираженні хімічного потенціалу речовини в об'ємі. За допомогою вказаних рівнянь здійснюється обробка експе-

риментальних даних: маючи залежність виду $\sigma = f(C)$ можна отримати функцію $\Gamma = f(C)$. Параметри процесу адсорбції ПАР з водних розчинів на поверхні дрібнозернистого граніту вивчалися на порошках вказаної ГП з розміром часток від 0,2 до 2 мм; для чого експериментально визначалося оптимальне співвідношення між масою твердої фази і об'ємом розчину, а також час встановлення адсорбційної рівноваги.

У дисперсійному середовищі, представленому, як правило, технічною водою, часто знаходяться сторонні іони, що мають активний хімічний вплив на результати адсорбції, тому для з'ясування його діапазонів додатково вводили у склад розчинів фоновий електроліт CaCl_2 .

Результати проведених досліджень, на прикладі іоногенної аніонактивної ПАР сульфонол – суміш натрієвих солей алкілбензолсульфоокислот з алкільними залишками, що вміщують 12 - 18 атомів вуглецю, зі структурною формулою (n – число атомів вуглецю)



представлено на рис. 8.7.

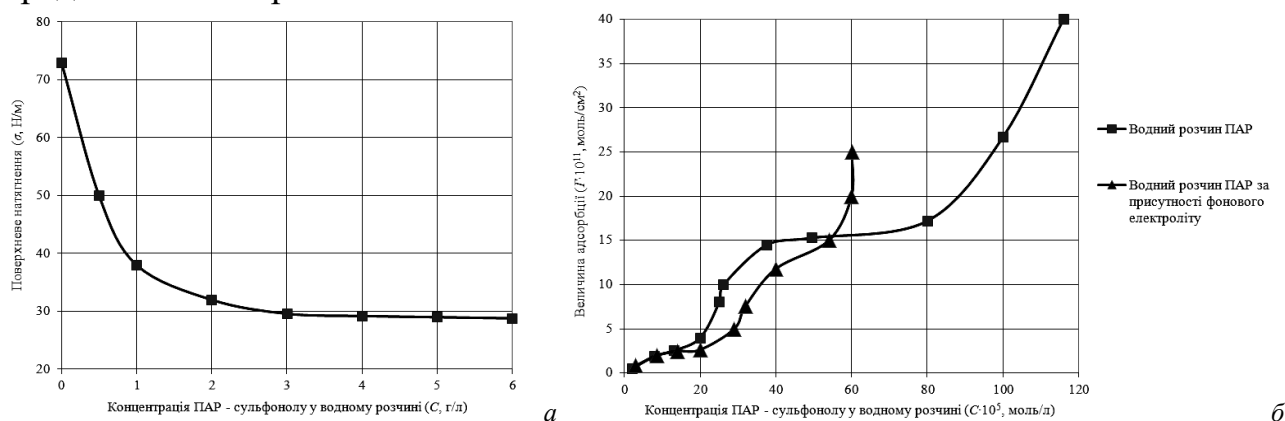


Рис. 8.7. Ізотерми поверхневого натягнення водного розчину (а) та адсорбції ПАР – сульфонола з водного розчину на поверхні дрібнозернистого граніту (б)

Масштаби зміни поверхневого натягнення водного розчину сульфонолу простежуються на відповідному графіку (рис. 8.7, а), причому наведені відомості беззаперечно свідчать про вельми значну активність названої ПАР за відносно низьких концентрацій – до 3 г/л; важливе і те, що перевищення зазначеного порогу не призведе до подальшого зниження σ , тобто дане значення C є граничним для розглядуваної ПАР. Що стосується адсорбційних якостей сульфонолу на поверхні ГП (рис. 8.7, б), то вони мають доволі складні ознаки, обумовлені як варіативністю C , так і фізико-хімічними особливостями дисперсійного середовища – визначуваними, у тому числі, активними компонентами дисперсної фази. Ізотерма адсорбції сульфонолу характеризується декількома відмітними ділянками: початкова з них – це майже пряма пропорційність (з коефіцієнтом пропорційності $k < 1$), яка відповідає електростатичній сорбції окремих іонів поверхнею породи; далі відбувається трансформація вигляду ізотерми у пара-

болічну криву із наступним тривалим виположуванням – щільне перекриття поверхні ГП іонами ПАР (зона плато на графіку) та черговим стрімким (за степеневою функцією високого порядку) збільшенням Γ ; при цьому встановлено: подальше збільшення сумарного значення C на факторі Γ практично не позначається. Відносно впливу електроліту CaCl_2 на розвиток адсорбційних процесів, то він проявляється у збереженні їх загальної спрямованості, проте за істотно менших абсолютних значень фактору Γ .

Гірські породи є, в основному, полікристалічними багатокомпонентними структурами з різними фізико-механічними характеристиками. Тому взаємодія ПР з різними складовими ГП неоднакова. До більшого впливу схильна цементуюча складова ГП, меншого – кристалічні включення, в силу своєї більш міцної структури. При сучасних режимах буріння, особливо при великих частотах обертання, ПРІ інтенсивно нагрівається, внаслідок чого значна частина енергії руйнування ГП переходить в теплову. Потік ПР, стикаючись з робочими поверхнями ПРІ, охолоджуючи його, сприяє створенню нормальних умов роботи і підвищує його стійкість. При цьому відбувається підвищення температури ПР, що впливає на процеси, які відбуваються на межі розділу фаз «ПР - тверде тіло». Відомо, що фізична адсорбція, яка знижує поверхневу енергію ГП, має зворотний характер, тобто її можна ліквідувати, наприклад, порівняно невеликим нагріванням; саме тому були проведені лабораторні дослідження впливу температури на поверхневу активність і адсорбційну здатність ПАР [14].

Щоб отримати залежності поверхневого натягу від температури, потрібно продиференціювати рівняння (8.3)

$$\frac{d\sigma}{dT} = \frac{d\sigma_o}{dT} + R\delta \ln\left(1 - \frac{\partial}{\partial_m}\right) - RT \frac{\partial_m}{\partial_m - \partial} \cdot \frac{d\partial}{dT}, \quad (8.7)$$

З даного рівняння видно, що температурний коефіцієнт поверхневого натягу таких систем включає залежність від температури. Оскільки перші два члена правої частини рівняння можна розрахувати, особливий інтерес представляє зміна адсорбції з температурою ($d\Gamma/dT$), яку можна визначити, продиференціювавши рівняння Ленгмюра з урахуванням співвідношення

$$\Delta H = \Delta\sigma + T\Delta S, \quad (8.8)$$

$$\frac{d\Gamma}{dT} = \frac{\Delta H / RT^2}{\left(\frac{C_\delta}{\Gamma_m^2}\right) \exp\left(\frac{W}{RT}\right) + \frac{2}{\Gamma_m} + \exp\left(\frac{-W}{RT}\right) C_\delta}. \quad (8.9)$$

Підставивши рівняння (8.9) в рівняння (8.7), отримуємо

$$\frac{d\sigma}{dT} = \frac{d\sigma_o}{dT} + R\delta_m \ln\left(1 - \frac{\partial}{\partial_m}\right) - RT \frac{\partial_m}{\partial_m - \partial} \cdot \left[\frac{\Delta H / RT^2}{\left(\frac{C_\delta}{\Gamma_m^2}\right) \exp\left(\frac{W}{RT}\right) + \frac{2}{\Gamma_m} + \exp\left(\frac{-W}{RT}\right) C_\delta} \right]. \quad (8.10)$$

Результати вимірювань з визначення впливу температури на поверхневий натяг водних розчинів різних ПАР наведені в табл. 8.2 і 8.3. Встановлено: підвищення температури призводить до збільшення поверхневої активності водних розчинів ПАР, що узгоджується з теоретичними висновками та пов'язано із виникненням явища зниження фізичної адсорбції і підвищення хімічної.

Таблиця 8.2

Вплив температури на хемосорбцію органічних речовин на залозистому кварцу

Органічна речовина		Температура, °С	Хемосорбція, моль/г
Найменування	Вміст, моль/л		
Дібензофуран	10^{-3}	20	2,2
		40	2,8
		80	3,9
Діфеніленоксид	10^{-3}	20	2,9
		40	3,9
		80	4,8
Хінолін	10^{-3}	20	1,8
		40	2,6
		80	3,5

Таблиця 8.3

Вплив температури на поверхневу активність і адсорбцію ПАР

Поверхнево-активні речовини		Температура, °С	Поверхневий натяг, Н/м	Адсорбція, $\Gamma \cdot 10^{11}$, моль/см ²
Найменування	Вміст, моль/л			
Сульфонол	28	20	32,2	10,5
		40	30,5	9,4
		60	28,9	8,1
		80	26,9	6,0
Катапін	40	20	41,4	5
		40	40,2	4,5
		60	38,5	3,6
		80	37,4	2,9
ОП-10	30	20	33,4	9,0
		40	32,8	8,2
		60	30,9	6,4
		80	30,1	5,1
Суміш сульфонола та ОП-10 (1:1)	30	20	30,2	10,8
		40	28,9	9,5
		60	27,5	8,3
		80	26,6	6,1

Аналізуючи отримані дані, можна зробити висновок про те, що адсорбційна активність, властивості адсорбційних шарів і вплив їх на умови взаємодії з

ГП, залежать від природи і будови ПАР, від мінералізації вод і температури тощо. Для успішного вирішення завдання підбору нових ефективних добавок органічних речовин до ПР і технологічних рідин, що поліпшують характеристики процесів при бурінні та експлуатації свердловин, розглянемо основні закономірності адсорбції їх на гідрофільних адсорбентах.

Однією з властивостей поверхні твердих тіл, від якої залежить величина адсорбції, є її заряд. Дія цього заряду проявляється дwoяко. З одного боку, виникнення зарядів викликає електростатичне тяжіння до поверхні іоногенних ПАР, заряджених протилежно. З іншого боку, за присутності в розчині фону з неактивного електроліту, поява зарядів на поверхні призводить до деформування подвійного електричного шару неорганічних іонів і витіснення в об'єм розчину великих органічних молекул і іонів [111].

Істотну роль в адсорбційних процесах на оксидах грають поверхневі гідроксильні групи. Вивчення ІЧ-спектрів адсорбованих молекул дозволило зробити висновок про утворення між гідроксильними групами поверхні і гідроксильними групами спиртів, кислот, фенолу тощо, водневого зв'язку. Сильна взаємодія з групами ОН проявляється також при адсорбції амінів. Однак в цьому випадку відбуваються і інші, більш глибокі взаємодії з оксидами, в результаті яких утворюються поверхневі хімічні сполуки. Слід зазначити, що можливість утворення хімічних сполук між адсорбатом і адсорбентом також залежить від природи адсорбенту. Так, стеаринова кислота адсорбується зворотно на SiO_2 , в той час як на оксидах алюмінію, магнію і цинку відбувається хемосорбція з утворенням на поверхні шару стеарату.

При проведенні досліджень приймається, що в молекулі органічної сполуки, яка знаходиться в об'ємі розчину, електрони розташовуються на строго фіксованих рівнях, енергія яких визначається величинами потенціалів іонізації. При наближенні молекули до поверхні, в результаті взаємодії електронів адсорбата з електронами адсорбенту, відбувається розщеплення електронних рівнів молекули і зміщення їх на величину λ [109]. При цьому замість строго фіксованого електронного рівня з'являється набір рівнів з різною енергією, при цьому електронний рівень набуває ширину F .

Зміна електронної будови молекул призводить до зміни енергії системи. Різниця в енергіях системи, коли молекули знаходяться далеко від поверхні адсорбенту і безпосередньо на поверхні, визначає енергія адсорбції E_{ad} .

Декількома дослідженнями показано, що для рівнів, які володіють одним і тим же типом симетрії, величина зсуву λ є функцією потенціалу іонізації і має мінімум при деякому характерному для даного металу значенні $J = J^*$. Для випадків адсорбції на простих металах маємо

$$\lambda = \lambda_0 + C \cdot \left\{ V - 2E - \frac{2 \cdot t \cdot \sqrt{E}}{\sqrt{2 \cdot m}} - \frac{\eta^2}{2 \cdot m \cdot X_0} - \frac{\eta^2}{2 \cdot m \cdot X_0} \right\} \cdot e^{-\frac{2}{\eta} \sqrt{2 \cdot m \cdot E \cdot X_0}} + \lambda(x_0) \cdot e \cdot \varphi, \quad (8.11)$$

$$E = I - \lambda - \lambda(x_0) e \frac{\varphi}{\lambda}, \quad (8.12)$$

де X_o – відстань від центру електронної орбіти до поверхні адсорбенту; V – відстань від дна зони провідності металу до дна зони провідності зовнішнього середовища; C – постійна, що залежить від об'ємних властивостей адсорбенту та X_o ; m – маса електрона; η – постійна Планка; I – деяка величина.

Через λ_o позначена частина зсуву рівня, що практично не залежить від потенціалу іонізації. Остання складова $\lambda(x_o) \cdot e \cdot \varphi$ в (8.11) враховує вплив стрибка потенціалу φ на межі «метал - електроліт» на положення рівнів молекул адсорбата. Коефіцієнт λ при X_o порядку товщини шару Гельмгольца, змінюється в межах від 1/2 до 1/15.

З виразу (8.11) випливає: зміщення рівня λ має мінімум при значенні потенціалу іонізації, що задовольняє рівнянню

$$J^* - \lambda - \lambda(x_o)e^\varphi = \frac{V}{2}. \tag{8.13}$$

Отримано також вирази залежності ширини рівня F від I . Через параметри λ і F енергія зв'язку молекул з поверхнею може бути записана у вигляді

$$E_{ad} = \int_{-\infty}^{E_F} (E - E_F) \cdot \left[\frac{1}{\pi} \cdot \frac{F}{(E - E_a)^2 + F^2} - \delta(E + J) \right] \cdot dE + U(n_e) = \tag{8.14}$$

$$= (E_a - E_F) \cdot n_e + \frac{F}{2\pi} \cdot \ln \frac{(E_F - E_a)^2 + F^2}{(V + E_a)^2 + F^2} + (J + E_F) \cdot \theta \cdot (E_F - J) + U(n_e),$$

де θ – функція стрибка; $U(n_e)$ – частина енергії, що залежить безпосередньо від величини λ і F , і від ступеня заповнення електронних рівнів n_e .

В U можуть бути включені всі види електростатичних взаємодій на поверхні адсорбенту. Величина U не залежить від I . Поява другої складової в правій частині рівняння (8.14) пов'язано з наявністю кінцевої ширини рівня адсорбованої молекули, і при $F < 0,5$ еВ вона менше першої складової [104].

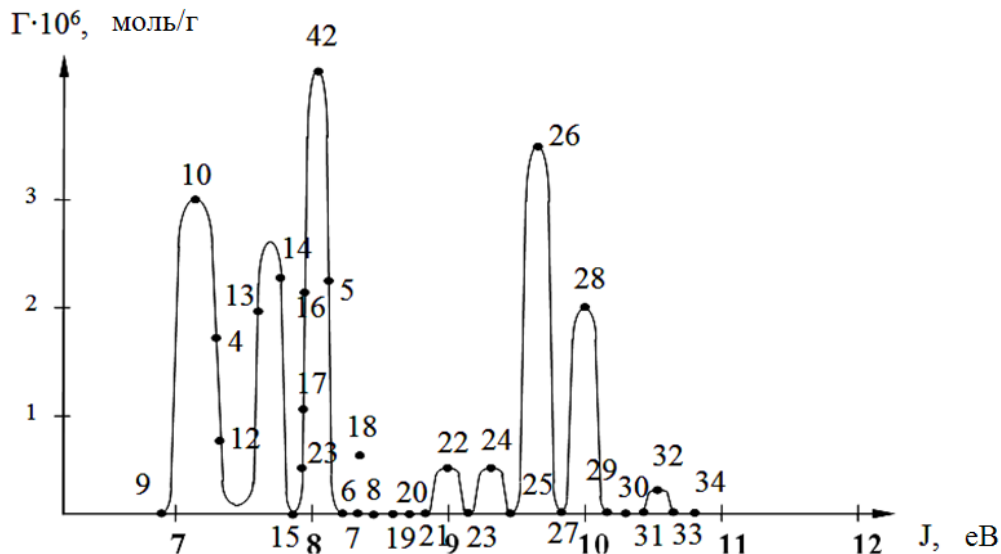


Рис. 8.8. Величина адсорбції деяких сполук від їх перших потенціалів іонізації

Наведені рівняння (8.11 - 8.14) описують обмінну взаємодію, обумовлену перекриванням хвильових функцій електронів молекул адсорбата і електронів

адсорбенту. Утворюваний при цьому хімічний зв'язок, за своєю природою, подібний до ковалентного, а вираш енергії визначається зміною енергії електронів при утворенні цього зв'язку. З рівнянь (8.11 - 8.14) також випливає, що енергія зв'язку E_{ad} , а, отже, і вільна енергія адсорбції та кількість адсорбованої речовини мають максимум при $J = J^*$ (рис. 8.8). Виходячи з експериментального характеру залежності адсорбції від J , було запропоновано називати потенціал іонізації, при якому досягається максимум адсорбції, резонансним потенціалом J_p . Для кожного оксиду є своє характерне значення J_p , що є, за суттю, його адсорбційною характеристикою. Переконливо показано, що подібна залежність дотримується при адсорбції сполук, що мають не тільки π -електрони, а й довголанцюгові ПАР, до складу яких входять гетероатоми. Ці сполуки вибірково адсорбуються на оксидах з певним резонансним потенціалом.

Таблиця 8.4

Резонансні потенціали оксидів

Оксид	J_p , eВ	Γ , моль/г
CuO	10,35; 10,55; 11,9; 11,5	$3,3 \cdot 10^6$
Al ₂ O ₃	9,6; 10,7; 11,4	$8,4 \cdot 10^6$
Al ₂ O ₃	9,6; 10,75; 11,4	$2,2 \cdot 10^6$
V ₂ O ₃	10,6; 11,0; 13,9	$2,3 \cdot 10^6$
Fe ₂ O ₃	8,3; 9,95; 11,5	$3,7 \cdot 10^6$
SiO ₂ (сілікагель)	10,4; 10,9; 11,9	$6,4 \cdot 10^6$
Кварц	9,0; 10,35; 10,9; 11,9	$2,0 \cdot 10^6$
ZnO	9,0; 10,6; 11,1	$4,0 \cdot 10^6$
SnO	10,7; 14,1	$2,0 \cdot 10^6$
CO ₂ O ₃	9,6; 10,3; 11,6	$4,0 \cdot 10^6$
SnO ₂	11,0; 12,95	$2,5 \cdot 10^6$
TiN	7,9; 9,0; 10,2; 11,3	$2,0 \cdot 10^6$
PbO ₂	9,3; 10,0; 11,6; 12,4	$6,0 \cdot 10^6$
S (сірка)	9,33; 9,47; 9,83; 10,12; 11,35	$3,0 \cdot 10^6$
TiO ₂		$2,4 \cdot 10^6$
НХ (нефеліонові хвости)	8,9; 10,2; 11,95	$2,0 \cdot 10^6$
Мусковіт чорний	9,85	$2,0 \cdot 10^7$
Бентоніт	9,0; 10,6; 11,9	$1,0 \cdot 10^7$
Каолін сирій	8,9; 10,1; 11,9	$2,07 \cdot 10^6$
Фталоціанін міді	10,26; 11,4	$8,67 \cdot 10^6$

На рис. 8.8 приведена залежність величини адсорбції органічних сполук від їх перших потенціалів іонізації [14]. На підставі цієї залежності оксиду алюмінію можна приписати такі значення J_p : 7,14; 7,6; 8,0; 9,5 і 9,85 eВ. Для пояснення поліекстремального характеру кривих $\Gamma(J)$ було залучено уявлення про наявність різних адсорбційних центрів на поверхні сорбентів. Іншими словами, молекули органічних сполук можуть хемосорбуватися не тільки за участю електронів верхньої зайнятої молекулярної орбіталі, а й за рахунок електронів будь-якого іншого енергетичного рівня.

На рис 8.9 приведена залежність величини адсорбції органічних речовин [102] на Al₂O₃, від перших і вищих потенціалів іонізації. Так як молекули адсо-

рбата характеризуються не одним, а кількома значеннями потенціалів іонізації, то визначення резонансних потенціалів оксиду алюмінію проводили шляхом підбору. Було знайдено, що з урахуванням вищих потенціалів іонізації для Al_2O_3 значення J_p рівні: 9,6; 10,4; 11,4 еВ. За аналогією з вищевикладеним впливає, що наведені значення J_p Al_2O_3 характеризують не тільки різні адсорбційні центри поверхні оксиду, а й різні енергетичні рівні цих центрів. У табл. 8.4, для ряду неорганічних адсорбентів, наведені значення J_p , визначені з урахуванням вищих потенціалів іонізації молекул адсорбата.

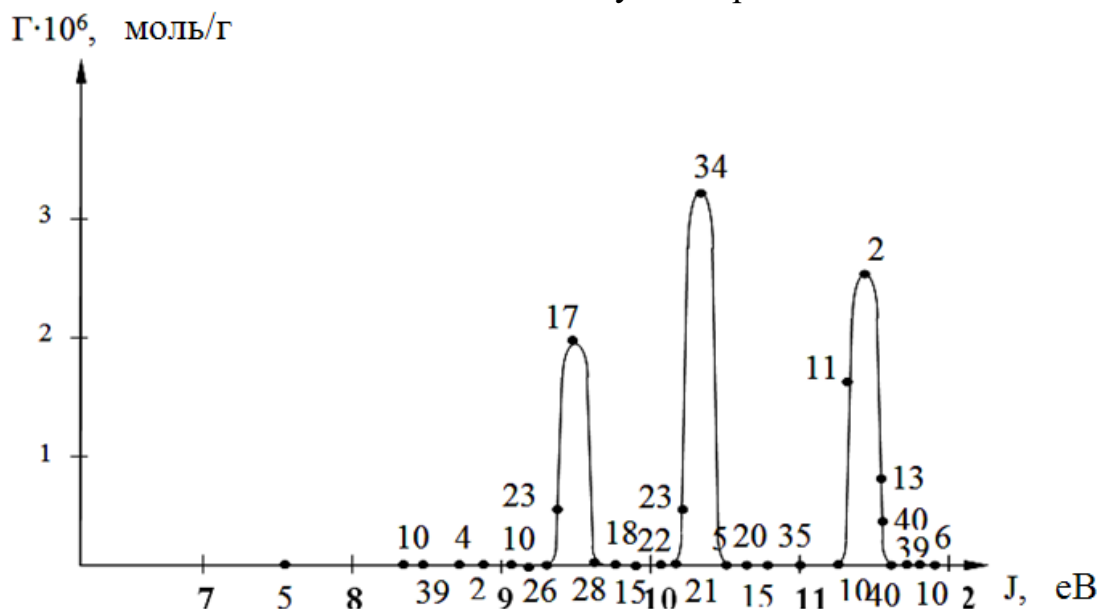


Рис. 8.9. Величина адсорбції органічних сполук, залежна від їх перших і вищих потенціалів іонізації

Використання зазначених даних може відбуватися і в разі необхідності вибору речовин (поверхнево-активні речовини), з метою прояву явища зниження твердості ГП. Для вирішення цього завдання слід визначити величину резонансних потенціалів різних зразків природних мінералів (або інших матеріалів і речовин) та підібрати ПАР з аналогічними потенціалами іонізації.

Для визначення резонансних потенціалів адсорбентів – кварцитів, були проведені експериментальні дослідження залежності адсорбції органічних речовин від їх потенціалу іонізації J . Органічні сполуки вибиралися таким чином, щоб їх потенціали іонізації досить щільно перекрили діапазон значень від 6,88 до 11,3 еВ (табл. 8.5). Значення J взяті з роботи [14] і розраховані за даними енергії переносу заряду в молекулярних комплексах за методикою, викладеною в [83].

Всі розчини готувалися на дистильованій воді і містили в якості фону 0,1 М $NaClO_4$. Адсорбція визначалася при кімнатній температурі зі зміни концентрації органічної речовини в рідкій фазі після внесення в неї навіски адсорбенту. Вимірювання проводились з розчинами, що містять 10^3 моль/л речовини або насиченим розчином, якщо речовина незадовільно розчиняється у воді. При цьому кількість внесеного адсорбенту складала (0,5 - 1,0 г). Час контакту фаз при періодичному перемішуванні – доба.

Таблиця 8.5

Органічні сполуки та їх перші потенціали іонізації

№ з/п	Сполука	J , eV	№ з/п	Сполука	J , eV
1	Бензидин	6,88	23	2-Пиколин	9,02
2	N,N-Диметиланілін	7,14	24	1,4-Нафтохинон	9,56
3	Дифеніламін	7,25	25	n-Бромдіметиланілін	7,05
4	I-Нафтиламін	7,30	26	Бензамід	9,40
5	M-Толудін	7,50	27	2,5-Динітробензойна кислота	10,70
6	Анілін	7,70	29	Пірокахетін	8,07
7	I-Нафтол	7,75	30	Пікринова кислота	10,20
9	Пірогалол	8,00	31	2,4-Динітротолуол	10,15
10	n-Креозол	8,24	32	n-Нітробензальдегід	10,30
11	Резорцин	8,31	33	Нітрометан	11,23
12	Фенол	8,50	34	Нітробензол	9,85
13	Хінолін	8,62	35	1,4-Динітробензол	10,44
14	Фурфурол	9,21	36	Акрилонітрил	10,90
15	Піридин	9,30	37	2-нітро-2-метілпропан	10,70
16	Бензойна кислота	9,40	38	2-Амінопіридин	8,34
17	Бензальдегід	9,51	39	Анізол	8,22
18	Бензонітрил	9,71	40	Дібензфуран	7,90
19	m-Нітробензойна кислота	10,30	41	Дифеніленоксид	8,09
20	m-Метилнафталін	7,96	42	Індол	7,74
21	Флорглюцин	7,87	43	Діметілхіналін	8,34
22	2,6-Лутидін	8,86	44	Анісовий альдегід	8,73

Фази поділялися центрифугуванням. Визначення концентрації органічних речовин здійснювали на спектрометрі СФ-16. Для двох значень довжин хвиль вимірювали оптичну густину водного розчину органічної речовини до і після адсорбції. Вимірювання оптичної густини проводилися згідно даних [103].

Так як молекула адсорбенту характеризується не одним, а кількома потенціалами іонізації, то визначення резонансних потенціалів проводили шляхом підбору. Методика вибору J_p (табл. 8.6) полягає в наступному. Якщо величини адсорбції двох різних органічних речовин сильно відрізняються, та мають однакові або близькі (менше 0,1 eV) значення потенціалів іонізації, то на графіку залежності $\Gamma(J)$ залишали точку з найменшою величиною адсорбції (Γ). Мінімальні значення наносили на графіки при всіх значеннях адсорбата. В якості величини резонансного потенціалу кварциту вибиралося значення того його потенціалу іонізації, яке відповідає точці на графіку, що має максимальне значення адсорбції.

Проведені дослідження показали, що всі вивчені кварцити характеризуються однаковими (або близькими) значеннями J_p . Виняток становлять тільки кварцити № 4 і № 7: $J_p = 9,9$ і $11,9$ eV. При цьому звертає на себе увагу той факт, що кількість оксиду заліза в цих сорбентах в кілька разів перевищує вміст SiO_2 . Отримані дані можна пояснити, якщо припустити, що значення $J_p = 9,9$ і $11,9$ eV характерні тільки для кисневих з'єднань атомів заліза в кварці.

Таблиця 8.6

Резонансні потенціали кварцитів

№	Назва породи	Резонансні потенціали іонізації з урахуванням вищих потенціалів іонізації органічних речовин, J_p , eВ
0	Кварцит-магнетит з прошарками кварцито-біотитових сланців	9,95; 10,4; 10,9; 11,9
1	Кварцит-магнетит силікатний	9,95; 10,4; 10,9; 11,9
2	Кварцит-амфібол-магнетит силікатний	9,95; 10,4; 10,9; 11,9
3	Кварцит залізно-слюдковий	9,95; 10,4; 10,9; 11,9
4	Кварцит магнетитовий червонополосчатий	9,95; 11,9
5	Кварцит-сидерит хлоритмагнетитовий	9,95; 10,4; 10,9; 11,9
6	Кварцит хлорит-сидеритмагнетитовий	9,95; 10,4; 10,9; 11,9
7	Кварцит магнетитовий червонополосчатий	9,95; 11,9

Таким чином максимальною хемосорбційною активністю на вивчених кварцитах будуть володіти ті ПАР, потенціали іонізації яких близькі до $J_p = 9,95; 10,4; 10,9$ і $11,9$ eВ. При проведенні досліджень бралось до уваги, що адсорбція органічних сполук на оксидах відбувається надзвичайно вибірково, причому на поверхні твердої фази адсорбуються речовини, потенціали іонізації яких лежать в інтервалі шириною $0,2$ eВ. Відповідно на залежності адсорбції Γ від J є максимум, положення якого визначається природою адсорбенту.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 8

1. Вивчено закономірності адсорбції ПАР з водних розчинів на залізистих кварцитах, на підставі чого зроблено висновок: адсорбція аніонних ПАР обумовлена електростатичною взаємодією позитивно зарядженої поверхні з аніонами; адсорбція неіоногенних ПАР зростає зі збільшенням числа груп в молекулі; адсорбція з розчинів сумішей ПАР на поверхні вище, ніж адсорбція із розчинів.

2. Відзначено, що в розчинах суміші ПАР спостерігається інгібування солей полівалентних металів, а адсорбція ПАР на поверхні гірських порід має сувору вибірково-характер.

4. Встановлено, що для кожної гірської породи є певне значення потенціалу іонізації (J_p), при якому досягається максимум адсорбції; причому при підвищенні температури фізична адсорбція зменшується (через інтенсифікацію молекулярного теплового руху), а ефективність хемосорбції дещо збільшується.

5. Доведено: якщо величина потенціалу іонізації породи і ПАР різняться між собою на $0,15$ eВ і більше, адсорбцію виявити практично не вдається.

6. Запропоновано для вибору ПАР при бурінні та експлуатації свердловин, використовувати відносні значення адсорбційних констант молекул ПАР.

7. Вибір значення потенціалу іонізації ПАР необхідно здійснювати таким чином, щоб результати вимірювань адсорбції узгоджувалися між собою.

8. Запропоновано кількість ПАР в промивальній та технологічній рідинах вибирати за величиною електрокінетичного потенціалу.

РОЗДІЛ 9. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПРОМИВАЛЬНИХ РІДИН НА ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ГІРСЬКИХ ПОРІД

9.1 Дослідження впливу середовища на розподіл напруження у твердому тілі при його зосередженому навантаженні

Процесу механічного руйнування твердого тіла, тобто утворення нової вільної поверхні під впливом прикладених зовнішніх навантажень, завжди передує етап навантаження зосередженим навантаженням [14]. Цей процес, при заданому характері розподілу системи зовнішніх сил, характеризується певним розподілом внутрішніх напружень і пов'язаних з ним деформацій, які описуються відомими співвідношеннями теорії пружності. Подальший розвиток процесів руйнування багато в чому визначається характером і інтенсивністю цих напружень (деформацій). Досліджуючи механіку взаємодії середовища і твердого тіла при руйнуванні важливо визначити [96], який вплив має кожний з наведених факторів на розподіл напружень в цих тілах. Зокрема, вельми важливо встановити, як впливає на розподіл напружень наявність середовища на поверхні навантаження. З цією метою було проведено серію експериментів, в основу яких було покладено поляризаційно-оптичний метод визначення деформацій у навантаженому зразку з оптично активного матеріалу (рис. 9.1).

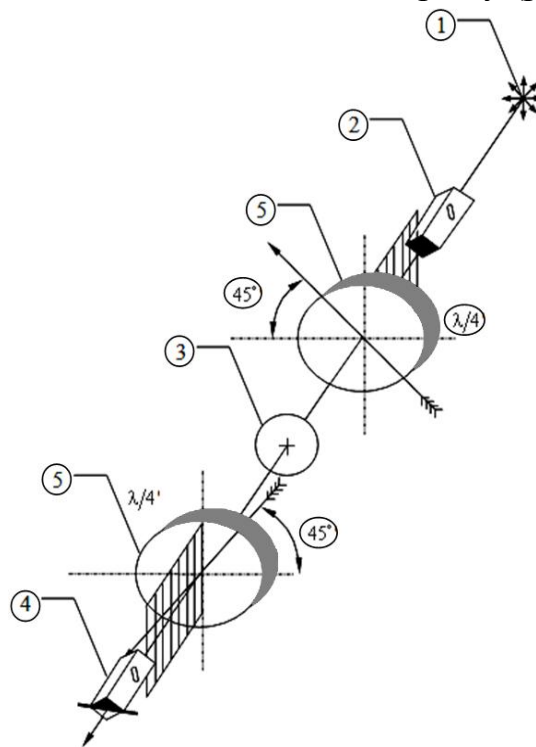


Рис. 9.1. Схема кругового полярископа: 1 – джерело світла; 2 – поляризатор; 3 – напружена модель; 4 – аналізатор; 5 – пластини в чверть довжини хвилі.

Поляризаційно-оптичний метод дослідження напруги заснований на властивості більшості прозорих ізотропних матеріалів набувати під дією напружень здатність подвійного променезаломлення, величина якого може бути виміряна оптичним методом при просвічуванні моделі поляризаційним світлом від моно-

хроматичного джерела 1 (рис. 9.1). Проїшовши через поляризатор 2, він перетворюється в плоскополяризований, необхідний для вимірювання оптичного ефекту. Напружена модель 3 розкладає світлову хвилю на два плоско поляризованих променя з різними швидкостями поширення. Ці промені, пройшовши аналізатор 4, дають на екрані інтерференційну картину [101].

Для зручності розшифрування отриманого зображення, тобто для отримання картини одних ізохорм без ізоклін, були застосовані пластини 4 товщиною в чверть хвилі. Їх розташування показано на рис. 9.1. В якості досліджуваної моделі застосовували пластину з отверженої епоксидної смоли розміром 60x60x5 мм. Для зменшення крихкості зразка при його виготовленні застосовували пластифікатор. Навантаження здійснювали зосередженим навантаженням на гідравлічному пресі з чисельною реєстрацією величини навантаження. Безпосередню дію на пластину здійснювали пуансоном клиноподібної форми. При додаванні навантаження до пластини здійснювали фотографування інтерференційних картин. Потім на поверхню зразка, без зняття навантаження, вводилася досліджувана рідина (розчини бензойної кислоти, дібензофурану, інтеробензолу та ін.) і знову здійснювали фіксування на фотоплівку. Фотографування інтерференційної картини робили безпосередньо після обробки розчином, а також після витримки протягом 5 і 10 хв для виявлення тимчасового чинника дії середовища. Дослідження проводили при різних значеннях навантаження в інтервалі 125 - 631 Н. Параметром порівняння виступала відстань від точки прикладання навантаження до інтерференційної смуги однакового порядку рис. 9.2.

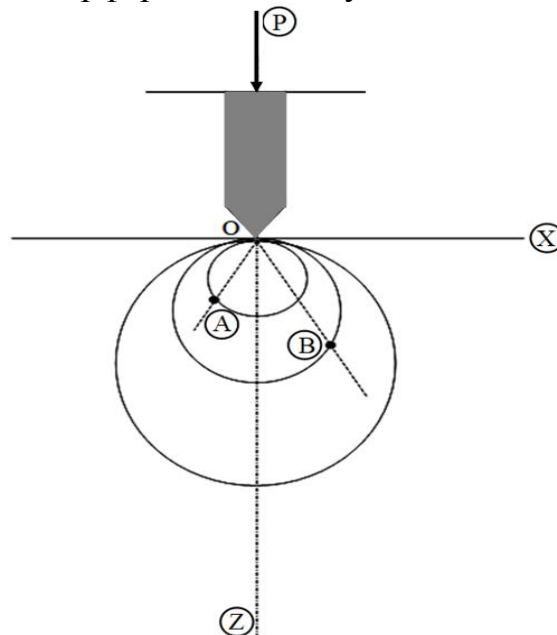


Рис. 9.2. Визначення впливу середовища на розподіл напружень

Щоб не допустити помилок, відстань від точки прикладання навантаження O до двох точок A і B , які відповідають інтерференційним смугам різного порядку, визначали як показано на рис. 9.2.

Для оцінки змін в характері розподілу напружень використовували відношення [83]

$$K = \frac{K_{AB}^I}{K_{AB}^{II}}, \quad (9.1)$$

де K_{AB}^I – відношення характерних параметрів, коли середовищем є повітря;
 K_{AB}^{II} – відношення характерних параметрів, коли середовищем є розчин ПАР.

Якщо $K = 1$, то напружений стан зразка в присутності ПАР на межі розділу не відрізняється від напруженого стану зразка при навантаженні на повітрі. Якщо $K > 1$ – спостерігається зниження інтенсивності напруженого стану зразка, при $K < 1$ – підвищення. Умови проведення експериментальних досліджень і їх результати наведені в табл. 9.1.

Таблиця 9.1

Умови проведення експериментів і результати досліджень впливу середовища на розподіл напружень у твердому тілі

№ експе- рименту	№ дослі- дження	Наванта- ження на пуансон	Характерні пара- метри на		K_{AB}	K	Час витри- мки, хв	Характер середо- вища
			ОА	ОВ				
1	1	12,6	1,4	2,5	0,55	1	0,5	повітря
1	2	12,6	1,3	2,4	0,53	1,04	1	розчин бензойної кислоти
1	3	12,6	1,4	2,6	0,54	1,02	5	
2	1	37,9	5,6	7,4	0,75	1	0,5	повітря
2	2	37,9	5,2	7,0	0,74	1,01	1	розчин інтробензо- ла
2	3	37,9	5,2	7,2	0,72	1,04	5	
2	4	37,9	5,3	7,5	0,7	1,07	10	
3	1	37,9	8,2	14,6	0,56	1	0,5	повітря
3	2	37,9	8,1	15,2	0,53	1,06	1	розчин дібензофу- рана
3	3	37,9	0,8	14,3	0,56	1	5	
3	4	37,9	8,1	17,7	0,55	1,02	10	
4	2	37,9	8,4	12,8	0,66	1	0,5	повітря
4	2	37,9	8,4	12,2	0,69	0,96	1	розчин диметила
4	3	37,9	8,5	13,1	0,65	1,02	5	
4	4	37,9	8,4	12,3	0,69	0,96	10	
5	1	63,1	8,0	12,3	0,66	1	0,5	повітря
5	2	63,1	7,8	12,1	0,65	1,02	1	розчин бензойної кислоти
5	3	63,1	7,8	12,1	0,63	1,05	5	
5	4	63,1	7,8	11,7	0,66	1	10	

Примітка: параметри ОА і ОВ можна порівняти лише в рамках одного і того ж характеру експерименту.

Аналіз отриманих даних дозволив зробити висновок про те, що присутність ПАР на межі розділу не чинить істотного впливу на характер розподілу напружень в зразку для прийнятої методики і умов досліджень [14].

В механіці утворення і розвитку тріщин, розглядають три їх типи: відриву, зсуву і зрізу [80]. При руйнуванні ГП в процесі буріння свердловин мають місце всі типи тріщиноутворення, однак, переважають тріщини відриву та зсуву. У зв'язку із сказаним, були проведені експерименти з дослідження впливу середовища на процес зародження і розвитку тріщин відриву і зсуву.

В якості критерію оцінки впливу середовища на процес тріщиноутворення використовували критичне значення коефіцієнта інтенсивності напружень при вершині тріщини (K_{Ic}), що залежить від міцності і пружних характеристик матеріалу, початкових розмірів тріщин і на величину якого впливає властивості середовища. В'язкість руйнування для тріщин відриву в нескінченних пластинках визначається виразом

$$K_{Ic} = \sigma_c \sqrt{\pi a}, \quad (9.2)$$

де σ_c – руйнуюча нормальне напруження; a – лінійний розмір тріщини.

Для пластинок кінцевих розмірів

$$K_{Ic} = \sigma_c \sqrt{\pi a} \cdot f\left(\frac{a}{W}\right), \quad (9.3)$$

де W – ширина пластини.

В основу експерименту було покладено відомий спосіб визначення в'язкості руйнування при трьохточковому вигині [14]. Схема навантаження представлена на рис. 9.3.

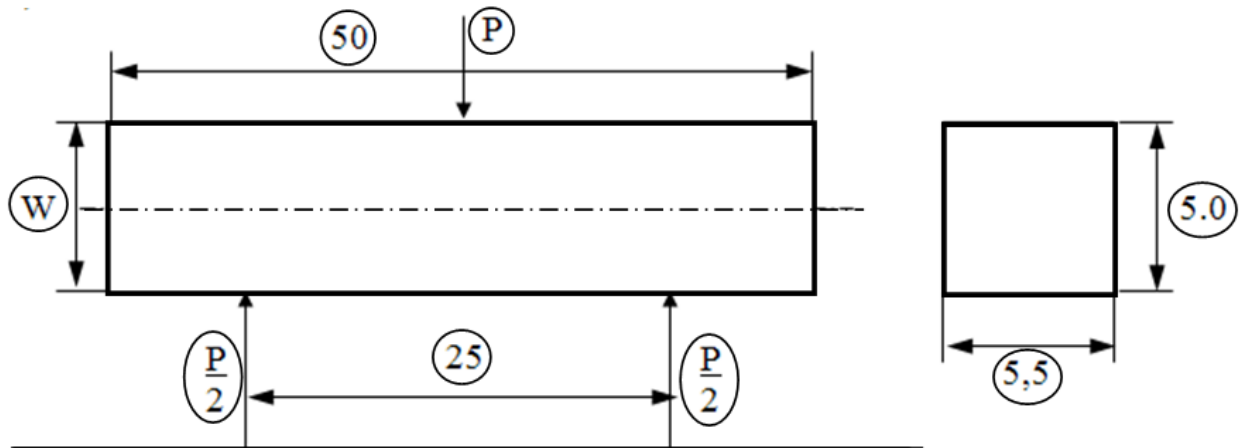


Рис. 9.3. Схема навантаження досліджуваного зразка при трьохточковому вигині

Для означеної на рис. 9.3 схеми навантаження, коефіцієнт K_{Ic} визначається виразом

$$K_{Ic} = \frac{P_c S}{BW^{3/2}} \left[2,9 \left(\frac{a}{W}\right)^{1/2} - 4,6 \left(\frac{a}{W}\right)^{3/2} + 21,8 \left(\frac{a}{W}\right)^{5/2} - 37,6 \left(\frac{a}{W}\right)^{7/2} \right], \quad (9.4)$$

де P_c – руйнівне зусилля для досліджуваного зразка, B – висота зразка, S – довжина ділянки навантаження.

При $a \ll W$ членами полінома (9.4) вищих ступенів можна знехтувати

$$K_{Ic} = 2,9 \frac{P_c S}{BW} \sqrt{a}, \quad (9.5)$$

Якщо величина K_{Ic} є мірою тріщиностійкості матеріалу, то величина $\psi(a) = \frac{K_{Ic}}{\sqrt{a}}$ може служити характеристикою тріщиностійкості конкретного зразка з даного матеріалу

$$\psi(a) = \frac{K_{Ic}}{\sqrt{a}} = 2,9 \frac{P_c S}{BW} = \alpha P_c, \quad (9.6)$$

де $\alpha = 2,9 \frac{S}{BW^2}$ – коефіцієнт, що характеризує геометричні розміри зразка.

Як видно з (9.6) $\psi(a)$ є лінійною функцією руйнівного навантаження P_c .

Для зразків з одного матеріалу з однаковими початковими розмірами концентраторів напружень (тріщин) справедлива наступна залежність

$$\psi(a_1) = \psi(a_2) = \psi(a_3) = \dots, \quad (9.7)$$

Лінійний характер виразу (9.6) дозволяє використовувати для характеристики властивостей міцності досліджуваних зразків значення руйнівного навантаження, а за залежністю (9.7) порівнювати між собою зразки з різними геометричними розмірами.

Дійсно, на підставі (9.7) ми можемо записати

$$\alpha^* P_c^* = \alpha_1 P_{c1} = \alpha_2 P_{c2} = \dots, \quad (9.8)$$

де α^* – деяке наведене значення коефіцієнта, що характеризує геометричні розміри зразка; P_c^* – відповідна цим розмірами наведене навантаження.

З (9.8) маємо

$$P_c^* = P_{c1} \frac{\alpha_1}{\alpha^*} = P_{c2} \frac{\alpha_2}{\alpha^*} = \dots, \quad (9.9)$$

або

$$P_c^* = P_{ic} K_i, \quad (9.10)$$

де $K_i = \frac{\alpha_i}{\alpha^*} = \frac{B^* W^{*2}}{B_i W_i^2}$ – коефіцієнт приведення; $i = 1, 2, 3 \dots n$ – номер дослідження; n – кількість досліджень в даному експерименті.

Якщо середовище впливає на процес зародження і розвитку тріщини, то для зразків з однаковими розмірами тріщин, що руйнуються в різних середовищах, залежність (9.7) виконуватися не буде, тобто

$$\psi'(a) \neq \psi''(a) \quad (9.11)$$

та

$$P_c^{*'} \neq P_c^{*''}. \quad (9.12)$$

Дослідження трьохточкового вигину проводили на зразках зі скла розміром $5 \times 5,5 \times 50$ мм. Відстань між точками реакції 25 мм. Для якісного проведення експерименту застосовували мінімально можливий і однаковий розмір початкових концентраторів напружень, тобто тріщин. Необхідний час травлення визначали дослідним шляхом. Для цього були підготовлені 5 партій по 20 зразків кожна. Необхідно зазначити, що першу партію зразків не протруювали. Решта оброблялася кислотою 30 с, 2 хв, 5 хв і 10 хв, відповідно кожна. Далі кожен партію руйнували на приладі УМГП-3 за схемою трьохточкового вигину і визначали значення контрольованої величини. Дані обробляли методами математичної статистики. Час травлення брали таким, при якому значення контрольованої величини зі збільшенням часу протруювання статично не змінювалося. Для всіх експериментів час травлення зразків був 8 хв.

Експерименти проводили на повітрі і в різних активних середовищах: дистильованій воді і водних розчинах ПАР [120]. Навантаження здійснювали при

швидкостях 8, 12, 20 і 78 Н/с. Умови проведення та результати експериментів наведено в табл. 9.2.

Таблиця 9.2

Умови проведення та результати досліджень з визначення впливу середовища на процес зародження і розвитку тріщин відриву

№ експерименту	Середня швидкість прикладення навантаження (Н/с)	Характер середовища	Час травлення, хв	Кількість досліджень	Середнє значення руйнівного навантаження, Н
1	8	Повітря	-	20	173,1
2	8	Повітря	0,5	21	180,8
3	8	Повітря	2	21	123,4
4	8	Повітря	5	20	313,1
5	8	Повітря	10	21	275,2
6	8	Неонол (0,25% ваг.)	8	21	210,3
7	8	Синтанол (0,25% ваг.)	8	21	211,8
8	8	Дистильована вода	8	16	287,3
9	8	Повітря	8	20	295,7
10	12	Повітря	8	20	284,5
11	20	Повітря	8	20	290,8
12	12	Дистильована вода	8	20	213,5
13	20	Дистильована вода	8	20	220,0
14	8	Катапін 0,05%	8	20	209,3
15	12	Катапін 0,05%	8	20	205,3
16	20	Катапін 0,05%	8	20	182,2
17	12	Синтанол (0,25% ваг.)	8	20	182,7
18	20	Синтанол (0,25% ваг.)	8	20	246,5
19	12	Неонол (0,25% ваг.)	8	20	246,5
20	20	Неонол (0,25% ваг.)	8	20	240,7
21	78	Повітря	8	20	324,6
22	78	Дистильована вода	8	20	329,5
23	78	Синтанол (0,25% ваг.)	8	20	398,4
24	78	Неонол (0,25% ваг.)	8	20	361,7

В результаті досліджень було встановлено, що навколишнє середовище впливає на розвиток тріщин відриву. Тріщини зсуву, зустрічаються в процесі буріння частіше, ніж тріщини відриву. Коефіцієнт інтенсивності напружень при зсуві визначається виразом

$$K_{\Pi c} = \tau_c \sqrt{\pi a}, \quad (9.13)$$

де τ_c – руйнівне дотичне напруження.

Дослідження одновісного стискування зразків проводили за схемою, представленою на рис. 9.4.

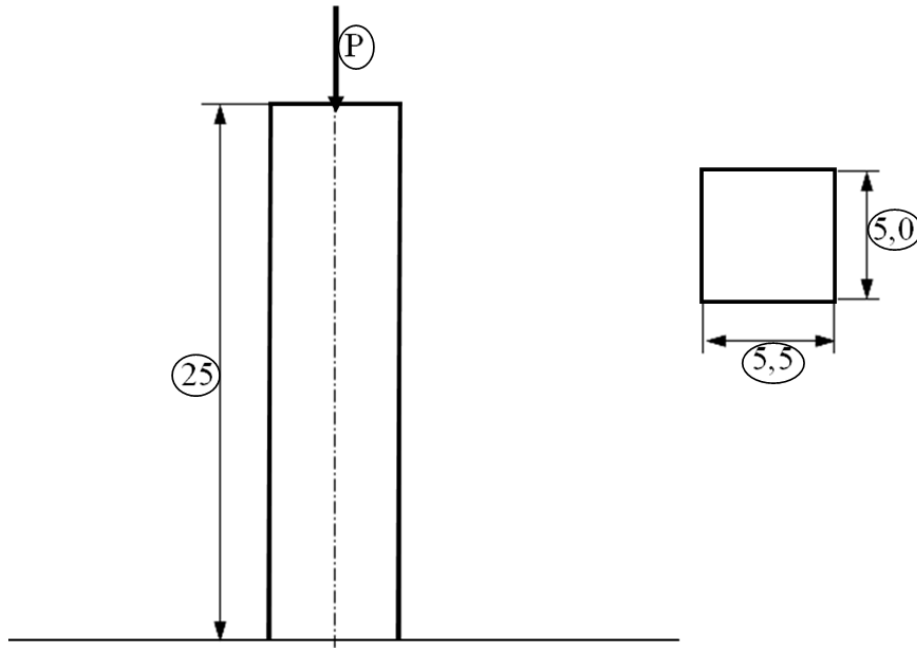


Рис. 9.4. Схема навантаження зразка при одноосьовому стисненні

Відповідно до особливостей наведеної схеми навантаження, в'язкість руйнування визначалася наступним виразом

$$K_{\Pi c} = \frac{P_c}{2BW} \sqrt{\pi a}. \quad (9.14)$$

В наш розгляд вводиться функція (див. вище)

$$\psi_\tau(a) = \frac{K_{\Pi c}}{\sqrt{a}} = \frac{\sqrt{\pi}}{2BW} P_c, \quad (9.15)$$

та відповідне їй величині наведене руйнівне навантаження

$$P_c^* = K_i P_c, \quad (9.16)$$

а також коефіцієнт приведення

$$K_i = \frac{B^* W^*}{B_i W_i}. \quad (9.17)$$

Величина наведеного навантаження характеризує руйнування досліджуваного зразка при одноосьовому стисканні [59].

Експеримент проводився на зразках зі скла. Наведені розміри зразків 0,5×5,5×25 мм. Технологія підготовки зразків і методика проведення експериментів (за винятком схеми навантаження) такі ж, як і при дослідженні впливу

середовища на процес зародження і розвитку тріщин відриву. Навантаження зразків здійснювали при швидкості 78 Н/с.

Умови проведення описаних нами експериментів і результати досліджень наведені в табл. 9.3.

Таблиця 9.3

Умови проведення та результати експериментів з визначення впливу середовища на процес зародження і розвитку тріщин зсуву

№ експерименту	Середня швидкість прикладення навантаження (Н/с)	Характер середовища	Час травлення, хв	Кількість досліджень	Середнє значення руйнівного навантаження, Н
1	78	Повітря	8	20	3582,5
2	78	Дистильована вода	8	20	3497,4
3	78	Синтанол	8	20	2759,9
4	78	Неонол	8	20	3597,9

Ґрунтовний аналіз отриманих даних дозволяє зробити висновок про те, що речовини, що адсорбуються на поверхні ГП, можуть значно інтенсифікувати процес зародження і розвитку тріщин зсуву [49].

9.2 Дослідження впливу органічних сполук та ПАР на міцність гірських порід

Визначення твердості і пов'язаних з нею фізико-механічних властивостей залізистих кварцитів здійснювали за методом Л.О. Шрейнера на приладі УМГП, який дає можливість отримати діаграми деформації породи і розрахунків за ними відповідних характеристик [14]. Для визначення характеристик міцності властивостей ГП були відібрані керни, з яких готували циліндри висотою 30 - 50 мм і діаметром 40 - 60 мм з плоскопаралельними поверхнями. Після виготовлення зразок підсушували в сушильній шафі при температурі не вище 100°C протягом 2 - 2,5 годин, потім охолоджували на повітрі. При випробуванні зразки ГП зберігалися в ексікаторах; за 30 хв до початку досліджень зразок витягувався і витримувався на повітрі. Потім поверхню зразка, з боку якого передбачалось вдавлювати штамп, за 1 год до визначення занурювали в випробуване середовище. Якщо ж це було неможливо, то середовище також за 1 год до дослідження наносилося піпеткою на обрану поверхню з подальшим підтриманням концентрації середовища шляхом заміни нанесених крапель свіжими. ПР готували на дистильованій воді. З метою зниження впливу розмірів зерен породи на відтворюваність результатів, діаметр площі контакту штампа вибирали не менше 6 - 7 середніх діаметрів зерен ГП.

Кожен графік деформації ГП, записаний на діаграмній стрічці піддавали відповідній обробці. За результатами обчислення величин міцності одиничних графіків деформацій, отриманих на одному зразку ГП, обчислювали їх середні

значення. Число вимірювань становило, як правило, не менше 5, відхилення від середнього значення для твердості становило 3 - 15%. Результати стендових досліджень впливу дисперсних систем, що містять органічні речовини і ПАР [113], на міцність залізистих кварцитів наведені в табл. 9.4 і 9.5. Назва органічних сполук, позначених цифрами, наведені в табл. 8.5 (див. розділ 8).

Таблиця 9.4

Вплив органічних сполук на міцність залізистих кварцитів

Середовище, розчин	Твердість $P_{ш}$, кг/мм ²	$A_{заг}$, кгм/см ²
Повітря	1530	1,43
Вода	1095	0,78
№2	1020	0,75
№3	915	0,65
№10	615	0,36
№12	735	0,47
№13	825	0,46
№14	885	0,64
№15	990	0,82
№16	720	0,57
№17	690	0,43
№22	600	0,42
№30	810	0,67
№34	1110	0,86
№39	1170	0,42
№40	1275	1,09
№43	930	0,59

Таблиця 9.5

Вплив ПАР на міцність залізистих кварцитів

Середовище, розчин	Твердість $P_{ш}$, кг/мм ²	$A_{заг}$, кгм/см ²
Вода	1000	0,75
Вода+феноксол (0,01%)	910	0,64
Вода+феноксол (0,05%)	730	0,48
Вода+феноксол (0,1%)	615	0,35
Вода+феноксол (0,001%)	990	0,72

Отримані результати дозволяють зробити висновок, що органічні сполуки і ПАР, які володіють високою адсорбційною здатністю, забезпечують істотне зниження міцності залізистих кварцитів [114].

Дослідження впливу ПР на мікротвердість ГП були проведені на приладі ПМТ-3, де в якості вдавлюючого наконечника застосовували алмазну піраміду з квадратною основою і кутом при вершині $\alpha = 136^\circ$. В результаті вдавлення алмазної піраміди на поверхні гірської породи отримували відбиток глибиною h та площею F , параметри якого піддавали відповідній обробці.

$$h = \frac{P}{F}, \quad (9.18)$$

$$F = \frac{d^2}{2 \sin \frac{\alpha}{2}}, \quad (9.19)$$

де α – кут при вершині піраміди; d – діагональ відбитка.

Підставивши в (9.18) значення F , отримаємо

$$h = \frac{2P \sin \frac{\alpha}{2}}{d^2} = \frac{1,8544}{d^2}, \quad (9.20)$$

$$2 \sin \frac{136^0}{2} = 1,8544, \quad (9.21)$$

В табл. 9.6 наведені результати досліджень впливу ПР на мікротвердість кальциту, вапняку, кварцу і кварциту.

Таблиця 9.6

Вплив середовища на мікротвердість гірських порід

Гірська порода	Показники	Мікротвердість в кг/мм ² та ефективність середовища в % до сухого		
		Насухо	Вода дистильована	0,15% сульфонола
Кальцит	Мікротвердість, R_m	62	38	59
	Ефективність, %	-	39	59
Вапняк	Мікротвердість, R_m	169	138	102
	Ефективність, %	-	14	38
Кварц	Мікротвердість, R_m	980	1000	860
	Ефективність, %	-	-	12
Кварцит	Мікротвердість, R_m	1100	1100	980
	Ефективність, %	-	-	11

З даних наведених в табл. 9.6 випливає, що вода знижує мікротвердість ГП. Вплив водних розчинів ПАР дещо більший, ніж при застосуванні води. Мікротвердість кварцу і кварциту при змочуванні водою не відрізняється від мікротвердості сухих зразків. Це пояснюється відсутністю умов, що сприяють проникненню середовища всередину цих тіл [60].

Для визначення динамічної міцності за методом товчіння, відібрані керни залізистих кварцитів розбивали на шматочки розміром 1,5 - 2,0 см за діаметром. З них набирали як мінімум п'ять проб об'ємом 15 - 20 см³. Приготовлені проби поміщали в воду і досліджуваний розчин органічних речовин і ПАР, де їх витримували протягом чотирьох годин. Після цього кожену пробу поміщали в ступку і товкли скиданням на неї гирі не менше десяти разів. Подрібнену таким чином ГП просівали, потім визначали об'єм і вираховували показник динамічної міцності.

В табл. 9.7 наведені результати дослідження впливу ПР на динамічну міцність залізистих кварцитів.

Таким чином експериментально встановлено, що органічні сполуки та ПАВ, які адсорбуються на залізистих кварцитах, сприяють суттєвому зниженню динамічної міцності ГП.

Таблиця 9.7

Вплив органічних сполук на динамічну міцність гірських порід

Промивальна рідина	Маса породи, г	Маса роздробленої породи з діаметром частинок до 0,5 мм, г	Висота стовпчика породи, мм	Досліджуваний зразок, доведений до однієї проби		Коефіцієнт динамічної міцності
				61,15 г	15 см ³	
				Маса частинок 0,5 мм, г	Висота стовпчика, мм	
На повітрі	62,5	6	7	5,9	6,9	29
В воді	61	6,2	8	6,2	8	25
№2	55,7	5,7	7	6,2	7,6	26
№3	62,2	6,9	9	6,8	8,9	22
№13	57,5	6,2	8	6,6	8,5	24
№17	68,9	8	10	7,1	8,9	22
№20	66	8,2	10	7,6	9,3	21
№22	69	7,3	9	6,4	7,9	25
№40	81	8,5	11	6,4	8,3	24
№43	67	8	10	7,3	9,0	22
№10	71,2	7,5	10	6,4	8,5	23
№12	57	8	11	8,6	11,8	17
№14	60,5	7,5	10,5	7,6	10,6	19
№15	67	7	9	6,4	8,2	24
№30	76,2	7	9	5,6	7,2	28
№16	67	8	11	7,3	10	20
№30	76,2	7	9	5,6	7,2	28
№39	61,2	8	11,5	8	11,5	17

Робіт зі встановлення впливу ПР на енергетичні характеристики процесу буріння, які б мали істотний вплив на розвиток механіки руйнування ГП, поки ще недостатньо. Для більш глибокого вивчення впливу ПР на процес руйнування ГП при бурінні були проведені відповідні теоретичні та експериментальні дослідження. При експериментальному вивченні велику увагу було приділено процесу різання, для чого використовували прилад «визначник буримості гірських порід ВІТР-ОТ», оснащений алмазним кругом.

Дослідженню, із наступним аналізом результатів, піддавали пластинки залістого кварциту з двома плоскопаралельними гранями, товщиною 30 мм, виготовленими з кернавого матеріалу. Кількість робочого середовища, що подавалася в зону різання у всіх дослідженнях було постійним і становило 4 мл/с. Глибина зрізів у всіх випадках залишалася однаковою. За базу порівняння була обрана технічна вода. В якості ПАР застосовували сульфонол, феноксол, а так само їх суміш. Кількість ПАР визначали за їх здатністю знижувати поверхневий натяг і змінювати дзета-потенціал (при ζ -потенціалі рівним 0 та таким, що максимально відрізняється від 0).

Для вивчення впливу ПАР на процес різання, визначали середнє значення швидкості різання при промиванні технічною водою і розчинами на 3 - 5 зрізів, які потім порівнювали між собою. У табл. 9.8 наведені результати досліджень.

Таблиця 9.8

Результати досліджень впливу бурових агентів на процес різання залістистих кварцитів

№	Робоче середовище	ξ-потенціал, мВ	Середня швидкість різання, мм/с	Приріст швидкості різання, %
1	Технічна вода	+1,9	0,045	-
2	Водний розчин сульфонола	+0,2	0,064	42
3	Водний розчин сульфонола	+4,2	0,052	15
4	Водний розчин феноксола	+0,4	0,065	44
5	Водний розчин феноксола	+6,9	0,053	17
6	Водний розчин суміші сульфонола і феноксола	-1,6	0,069	49

Важливим показником процесу буріння свердловин, що характеризує витрати роботи на одиницю зруйнованої породи, є питома енергоємність. Вона може бути визначена наступним чином [82]

$$E = \frac{2 \cdot \pi \cdot M}{h \cdot S}, \quad (9.22)$$

де h – глибина занурення руйнівного елемента; M – обертаючий момент.

Наведена нами формула (9.22) дозволяє, знаючи чисельні значення її параметрів, визначити загальну енергоємність процесу буріння і власне руйнування ГП за даного процесу.

На буровому стенді вимір крутного моменту здійснювали тензометричним способом із застосуванням електронно-променевого осцилографа. Режимні параметри в процесі досліджень підтримувалися постійними: частота обертання 480 об/хв; осьове навантаження 11000 Н; кількість бурового агента 20 л/хв. За базу порівняння були прийняті показники, отримані при бурінні з технічною водою. В якості бурового агента застосовували водний розчин суміші ПАР сульфонолу і феноксолу (1:1), кількість якої підтримували в діапазоні зниження ξ-потенціалу в межах 0,25 - 0,5%. Результати експериментальних досліджень процесу буріння приведені в табл. 9.9.

Руйнування твердого тіла завжди полягає в поступовому розвитку нових поверхонь розділу з навколишнім середовищем, і величина вільної поверхневої енергії тіла, яке руйнується, в основному визначає роботу поділу твердого тіла на частини – роботу диспергування як міру твердості. З іншого боку, з термодинаміки добре відомо, що позитивна адсорбція речовини, введеної в навколишнє середовище, тобто концентрування його молекул поблизу поверхні, завжди супроводжується відповідним зниженням вільної поверхневої енергії [107].

Рідина, в якій відбуваються процеси деформування і руйнування твердого тіла, може активно брати участь в цих процесах, полегшуючи і прискорюючи їх. У процесах механічного руйнування твердого тіла під впливом зовнішніх зусиль, переданих тілу якимось інструментом, в деформованих його шарах,

прилеглих до поверхні руйнування, утворюються зона передруйнування та область підвищеної тріщинуватості. У зародок мікротріщини цієї зони проникає зовнішнє середовище, тобто рідина змочує дане тверде тіло. Підвищуючи молекулярну спорідненість цієї рідини до поверхні твердого тіла, можна значно полегшити процеси його деформування і руйнування, викликаючи розм'якшення твердого тіла в зоні пружних або пластичних деформацій і таким чином викликати зниження твердості або міцності тіла, що деформується, під впливом проникнення рідини в зону перед руйнування [14].

Таблиця 9.9

Вплив ПР на енергоємність руйнування ГП

Породоруйнівний інструмент	Буровий агент	Дзета (ζ) потенціал	Обертаючий момент M , Н·м	Енергоємність, Н·м/см ²
Алмазна коронка	Технічна вода	+2,1	54,8	0,215
	Водний розчин феноксола і сульфанола	-1,2	26,4	0,168

При взаємодії ПР, обробленої, наприклад, електрохімічним методом, і твердих ГП, відбувається зниження величини навантаження, за якого проходить руйнування породи, з одночасним зменшенням величини питомої об'ємної роботи руйнування. На нашу думку, це досягається за рахунок ефекту адсорбційного зниження міцності твердих тіл. Згідно з енергетичним трактуванням, ефект знеміцнення характеризується зниженням роботи на утворення нових поверхонь в твердому тілі в процесі деформації і руйнування під впливом формування на них адсорбційного шару. За силовим трактуванням, розповсюдження адсорбційного шару по поверхні дефекту (мікротріщини), що інтенсивно розвивається, пов'язане з виникненням розсувного зусилля.

Адсорбційне зниження твердості відбувається внаслідок підвищення спорідненості ГП, яка піддається руйнуванню, та ПР. Це проявляється в інтенсивному зв'язуванні водних (гідратних) оболонок на внутрішній поверхні мікроциліндрів або їх устях. Утворення водних оболонок на поверхнях твердого тіла і зміна їх товщини може відбуватися при зміні концентрації позитивно або негативно заряджених іонів (іони водню H^+ та гідроксилу OH^-), які можуть адсорбуватися на поверхні твердого тіла з утворенням так званого подвійного електричного шару. Такий шар складається з двох частин: адсорбційного шару, пов'язаного з поверхнею, і рухомого – дифузного шару. У адсорбційний шар входять іони даного знака – негативні іони (аніони) або позитивні іони (катіони) і частина протилежно заряджених іонів – противоіони. Решта надлишкових противоіонів, необхідних для дотримання загальної електронейтральності, утворюють дифузний шар (іонну атмосферу), щільність якої поступово зменшується з віддаленням від поверхні.

Падіння електричного потенціалу в дифузійній частині подвійного шару, тобто різниці потенціалів між нерухомим адсорбційним шаром і зовнішньою

межею дифузійної оболонки, є електрокінетичним потенціалом твердої поверхні в даній рідині і характеризує її заряд. При дуже малих концентраціях дисоційованих іонів нерухомий адсорбційний шар насичений. Підвищення концентрації іонів в рідині викликає адсорбцію їх з однойменно зарядженими іонами адсорбційного шару. При цьому відбувається перехід відповідної кількості противоіонів з рідини в дифузний шар. Цей процес супроводжується збільшенням електрокінетичного потенціалу поверхні твердого тіла.

Дифузний шар іонів пов'язує з поверхнею велику кількість води, що міститься в цьому шарі. Тому утворення дифузного подвійного шару на поверхні значно збільшує товщину пов'язаної з нею гідратної оболонки, особливо за рахунок гідратованих іонів, що утворюють дифузний шар. Рівень гідратації поверхні, за рахунок подвійного шару, в певній мірі характеризується величиною електрокінетичного потенціалу.

Разом з утворенням подвійного електричного шару, іони дисоційованої води можуть вступати в обмінну адсорбцію з іонами поверхні твердого тіла [115]. При цьому буде відбуватися підвищення інтенсивності взаємодії поверхні з водою (збільшення гідрофільності). Так, наприклад, впливає лужна складова електрохімічно обробленої ПР на карбонатні породи. На поверхні цих ГП будуть адсорбуватися аніони OH^- , а в дифузний шар переходити противоіони. Поряд з адсорбцією іонів в подвійному шарі відбувається обмін аніонів CO_3^{2-} на аніони OH^- безпосередньо біля поверхні породи, що також підвищує гідрофільність поверхні. З підвищенням концентрації така обмінна адсорбція сама по собі призводить до безперервного збільшення ефективності зменшення міцності до певного значення, що відповідає повному насиченню шару. Тобто маємо прямий зв'язок між концентрацією іонів водню H^+ та гідроксиду OH^- , яка виражається через значення водневого показника рН, і ефективністю зниження міцності порід при проведенні руйнування на контакті поверхні ГП із ПР і ПРІ.

В процесі буріння, при взаємодії ГП і електрохімічно обробленої ПР з високим значенням рН, відбувається адсорбція негативно заряджених іонів гідроксиду на поверхні стінок свердловини і поверхні її вибою. При цьому, так як при руйнуванні вибою відбувається утворення нових поверхонь, то і адсорбція OH^- відповідно здійснюється більш інтенсивно. Також аніони адсорбуються на утворених частинках шламу. Все це призводить до зниження концентрації іонів гідроксиду і, як наслідок, зменшення рівня значення рН ПР. Тому необхідно підтримувати кількість іонів OH^- на певному початковому рівні за допомогою повторної проточної катодної обробки ПР в електроактиваторах [116].

Є підстави вважати, що зниження твердості ГП при бурінні з використанням електрохімічно обробленої ПР, пов'язано зі зниженими значеннями поверхневого натягу останньої. Це узгоджується з ефектом адсорбційного зниження міцності твердих тіл – ефектом П.О. Ребіндера [14]. При цьому енергія змочування на одиницю змоченою поверхні тим більше, чим більше фізико-хімічна спорідненість тіла, яке піддається руйнуванню, до рідини.

Енергія змочування і є кількісною мірою цієї спорідненості, тобто мірою здатності даної рідини насичувати вільні молекулярні сили на заново утворених

поверхнях в твердому тілі. Ця величина енергії змочування залежить від молекулярної природи, як твердого тіла (гірської породи), так і промивальної (а в іншому трактуванні – технологічної) рідини.

Також на ступінь зниження міцності ГП при бурінні з використанням електрохімічно обробленої ПР, впливає час її контакту з поверхнею твердого тіла. За попередніми теоретичними оцінками достатній час для реалізації ефекту зміни фізико-механічних властивостей ГП має дуже малі значення – близько 0,01 - 0,1 с. Цей висновок ґрунтується на наступних положеннях: адсорбція іонів гідроксилу на поверхні ГП відбувається практично миттєво; при контакті ГП з різцем долота між ними знаходиться плівка ПР, яка в свою чергу впливає на властивості розбурюваної ГП в області руйнування.

В цілому ж інтенсивність впливу електрохімічно обробленої ПР на ГП, виражається в ступені зміни їх фізико-механічних властивостей та залежить від наступних параметрів:

1. Величини молекулярної спорідненості ПР і поверхні твердого тіла (гірської породи) – чим вище ця спорідненість, тим швидше відбувається процес адсорбції позитивно або негативно заряджених іонів (іони водню H^+ та гідроксилу OH^-), який, в свою чергу, викликає зниження твердості або міцності тіла, що деформується.

2. Часу контакту електрохімічно обробленої ПР і поверхні ГП – як було показано, достатній час для реалізації ефекту зміни фізико-механічних властивостей розбурюваних ГП має значення 0,01 - 0,1 с, тобто відповідні процеси відбуваються практично миттєво.

3. Концентрації заряджених іонів водню H^+ та гідроксилу OH^- , тобто величини рН – утворення водних оболонок на поверхнях твердого тіла і зміна їх товщини може відбуватися за зміни концентрації позитивно або негативно заряджених іонів (іони водню H^+ та гідроксилу OH^-), які можуть адсорбуватися на поверхні твердого тіла з утворенням подвійного електричного шару.

4. Наявності і кількості на одиницю площі мікротріщин на поверхні твердого тіла, в які проникає активована ПР і адсорбується на їх внутрішній поверхні, тим самим знижуючи міцність ГП.

Для визначення рівня зміни міцності окремих типів ГП використовувався метод Шрейнера, який полягає в тому, що для досліджуваних зразків ГП задають площу контакту і вимірюють навантаження на індентор, під дією якого відбуваються деформування і руйнування ГП. Метод вдавнення штампа дозволяє не тільки визначати твердість ГП, а й оцінювати їх пружні і пластичні характеристики на невеликих зразках і на кернах. Для реалізації методу була використана спеціальна установка УМПП-3 з автоматичним записом залежності навантаження на штамп від глибини його занурення. Розрахункове навантаження 0 - 0,98; 0 - 2,45; 0 - 4,9 і 0 - 9,81 кН з граничною величиною занурення 750 мкм.

Метою лабораторних досліджень є визначення зміни значень механічних властивостей ГП при впливі на них електрохімічно активованої рідини [117].

Завданнями експериментальних лабораторних досліджень було: визначення пружних і пластичних сил деформації ГП при вдавлюванні індентора; вста-

новлення значень питомої об'ємної роботи руйнування породи; визначення твердості ГП за штампом і її зміна при впливі на неї активованої рідини.

При випробуваннях вівся запис графіків навантаження – глибини вдавнення, знятих в різних місцях зразка, що дозволяє судити про однорідність зразка і спостерігати за розкидом значень.

Штамп в зразок породи вдавлювався до тих пір, поки при деякому навантаженні не відбувалось крихке руйнування породи під штампом або не була досягнута гранична величина занурення. Швидкість навантаження складала близько 0,5 - 1,0 МПа/с.

Відібрані та підготовлені зразки характеризувалися наступними параметрами. Форма зразків циліндрична, діаметр 40 - 50 мм. Відношення довжини зразка l до діаметру d становить $1 \pm 0,05$. Торцеві поверхні відшліфовані. Відхилення від паралельності торців не більше 0,05 мм за діаметром основи зразка, відхилення від перпендикулярності торців до утворюючої циліндра не більше 0,05 мм; опуклість торців не більше 0,003 мм.

Досліджувана поверхня зразка ділиться на чотири рівні сектори. Перший сектор залишається необробленим в сухому стані. Другий сектор змочується водопровідною водою. Третій і четвертий сектори обробляються кислотною і лужною рідиною з $pH = 3$ і $pH = 9$ відповідно, отриманих шляхом електрохімічної активації. У кожному секторі проводиться по три занурення індентора із записом графіків на одному аркуші.

При обробці даних записів, облік ведеться за середньоарифметичним значенням величини, отриманої при випробуванні.

У процесі досліджень визначалися наступні показники параметрів механічних властивостей ГП.

1. Найбільше навантаження P_p (кН), яка відповідає величині навантаження, за якого відбувається крихке руйнування породи під штампом.

2. Твердість ГП за штампом $p_{ш}$ (кН/мм²):

$$p_{ш} = P_p / F, \quad (9.23)$$

де F – площа штампа ($F = \pi d^2 / 4$); d – діаметр штампа.

3. Питома об'ємна робота руйнування A_v , яка визначається діленням загальної роботи A_p , витраченої до моменту руйнування, на об'єм лунки V , що утворилася при руйнуванні: $A_v = A_p / V$.

Об'єм лунки визначали наступним способом: лунка заповнювалася пластиліном, потім зліпок витягувався, зважувався і обчислювався об'єм, оскільки щільність пластиліну відома.

Результати лабораторних досліджень наведено у вигляді діаграм (рис. 9.5 - 9.7). Наведені дані свідчать про те, що вплив кислотної складової електрохімічно обробленої рідини дозволяє знизити величину навантаження, при якій відбувається руйнування ГП, в середньому на $7 \div 8\%$, а вплив лужної складової – відповідно на $9 \div 10\%$ в порівнянні з впливом рідини, необробленої електричним струмом. Одночасно при використанні лужної фракції рідини спостерігається значне зменшення величини питомої об'ємної роботи руйнування. У середньому вона становить $22 \div 24\%$, а в окремих випадках досягає 40% , що в свою чер-

гу, повинно забезпечити підвищення механічної швидкості і ефективності буріння. Також, як наслідок, знижується знос бурових доліт і інструменту.

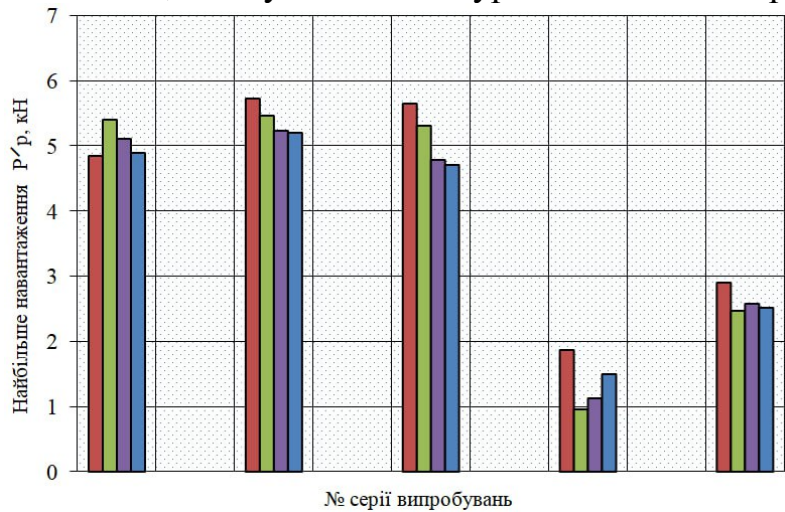


Рис. 9.5. Діаграма величин середньозважених значень найбільшого навантаження P_p (кН), при якій відбувається крихке руйнування ГП

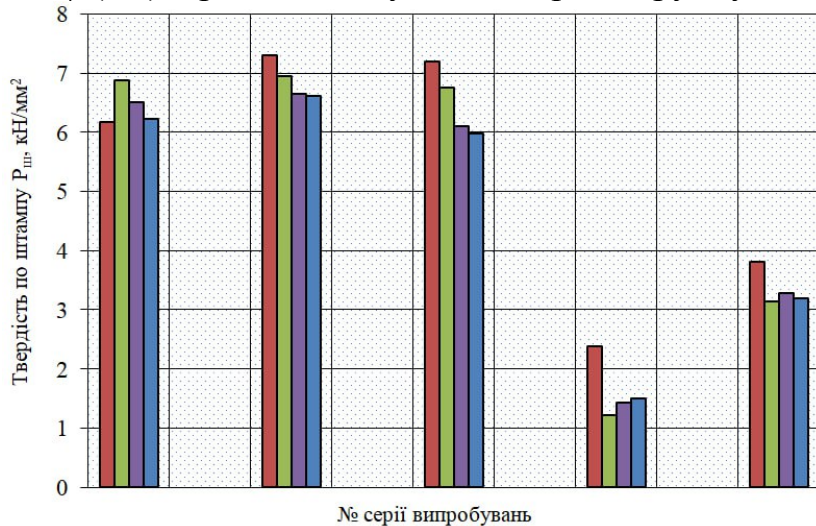


Рис. 9.6. Діаграма величин значень твердості по штампі, отриманих при проведенні експериментів на установці УМПІ-3

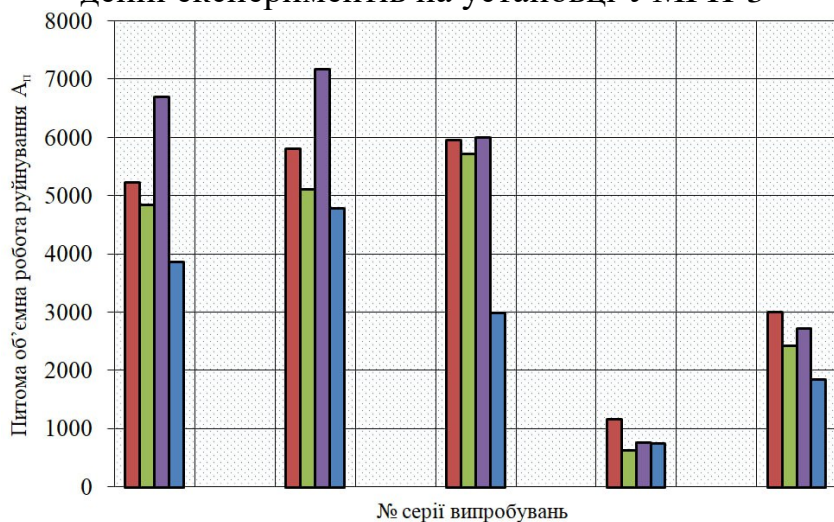


Рис. 9.7. Діаграма величин значень питомої об'ємної роботи руйнування, отриманих при проведенні експериментів на установці УМПІ-3

Одночасно при використанні лужної фракції рідини спостерігається значне зменшення величини питомої об'ємної роботи руйнування. У середньому вона становить $22 \div 24\%$, а в окремих випадках досягає 40% , що в свою чергу, повинно забезпечити підвищення механічної швидкості і ефективності буріння. Також, як наслідок, знижується знос бурових доліт і інструменту при бурінні в названих ГП.

На нашу думку, зниження величини навантаження, при якій відбувається руйнування породи, з одночасним зменшенням величини питомої об'ємної роботи руйнування, досягається внаслідок ефекту адсорбційного зниження міцності твердих тіл. Згідно енергетичного трактування, ефект зменшення міцності характеризується зниженням роботи на утворення нових поверхонь в твердому тілі в процесі деформації і руйнування, під впливом формування на них адсорбційного шару. При силовому трактуванні проникнення адсорбційного шару по поверхні дефекту (мікротріщини), пов'язане з виникненням розсувного зусилля.

Дослідження впливу основних видів домішок при проведенні електрохімічної обробки ПР дозволило виявити деякі закономірності. В результаті катодної електрохімічної обробки промивальна рідина набуває лужну реакцію за рахунок перетворення деякої частини розчинених солей в гідроксиди і присутності надлишкових гідроксильних груп OH^- , при цьому рівень рН відповідно збільшується. Окислювально-відновний потенціал (ОВП) рідини, який є мірою хімічної активності елементів пов'язаних з приєднанням або передачею електронів, різко знижується. Величина ОВП, що залежить від температури і рівня рН, досягає значення 950 мВ і нижче.

Що стосується поверхневого натягу, то в результаті катодної електрохімічної обробки він зменшується.

Розглянемо сутність виникаючих ефектів при адсорбції ПАР зі складу ПР на внутрішніх поверхнях дефектів твердих тіл, які відіграють важливу роль в процесах руйнування, тертя і зносу при бурінні свердловин [118].

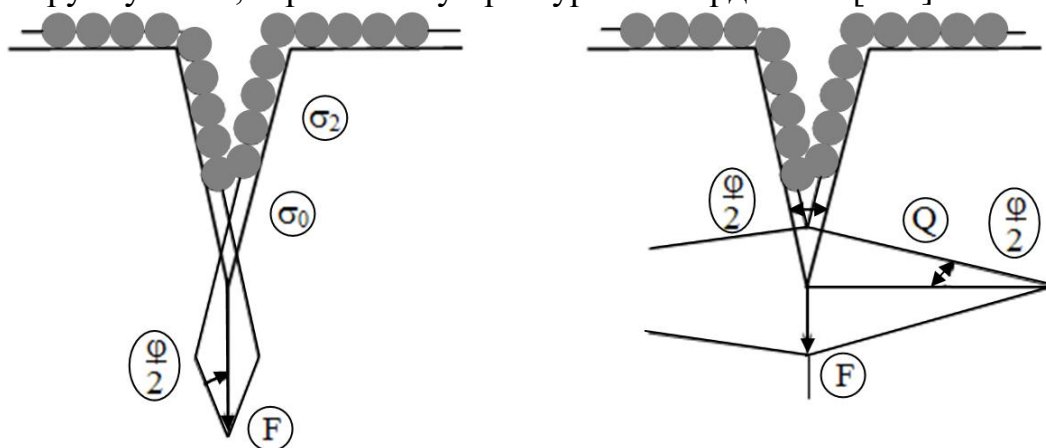


Рис. 9.8. Умовна модель адсорбційного розклинення тріщини

Промивальні рідини, що містять ПАР [119], проникають всередину мікротріщин під дією капілярного тиску, мігруючи по її стінках. Таке проникнення відбувається з досить великими швидкостями. Це пояснюється зниженням поверхневої енергії всередині тріщини під впливом адсорбції на величину $\Delta\sigma$

$$\Delta\sigma = \sigma_0 - \sigma_{\gamma}, \quad (9.24)$$

де σ_0 – питома поверхнева енергія твердого тіла до адсорбції; σ_{γ} – питома поверхнева енергія після адсорбції.

Наведена на рис 9.8 модель адсорбційного розклинення дає можливість більш детально розглянути це явище.

Поверхнево-активні речовини проникають всередину мікротріщин до місць, де розміри тріщин дорівнюють розмірам їх молекул. У цих місцях утворюється лінійна межа поширення адсорбційного шару, на кожну одиницю довжини якої діє двовимірне тиск F

$$F = 2\Delta K \cos \varphi / 2, \quad (9.25)$$

де K – коефіцієнт, що враховує лінійні розміри утворюваної тріщини; φ – кут при вершині тріщини.

Під дією тиску F відбувається просування адсорбційних шарів вглиб тріщини, тим самим викликаючи її розклинення з силою Q

$$Q = \frac{F}{2 \sin \varphi / 2}. \quad (9.26)$$

Підставляючи у вираз (9.26) значення тиску F , отримаємо

$$Q = \frac{2\Delta\sigma K \cos \varphi / 2}{2 \sin \varphi / 2} \quad (9.27)$$

Таке розклинення шарами мікротріщин пропорційно зниженню поверхневої енергії при адсорбції всередині тріщини і тим самим воно більше, чим менше кут при вершині. Зовнішні зусилля сприяють розкриттю мікротріщин і збільшенню кількості проникаючих у них ПАР.

Наведена модель мікротріщини досить спрощена і в дійсності ускладнюється механо-хімічною активацією твердого тіла у вершині тріщини, а також впливом зовнішніх чинників.

Це місце робиться більш активним у всіх хімічних і фізичних процесах, в тому числі і при дифузії середовища в активовану при вершині решітки металу. У тих випадках, коли середовище діє на метал не тільки за адсорбційним механізмом, але і розчиняє його або вступає в іншу взаємодію, картина всередині тріщини значно ускладнюється [14].

Зниження поверхневої енергії ГП, що полегшує їх руйнування і деформацію, може відбуватися у зв'язку з фізичною або хімічною адсорбцією, які є термодинамічно неминучим явищем.

При проведенні досліджень впливу промивальних рідин, що містять ПАР, на ефективну поверхневу енергію залістистих кварцитів був застосований інженерний метод, сутність якого полягає в наступному. З керованого матеріалу виготовляли зразки у вигляді балочок довжиною 100 - 150 мм з прямокутною формою перетину (25×8 мм). У балочках алмазним диском нарізали штучну тріщину, що виходить на поверхню, глибиною понад 0,2 висоти балочки. При цьому радіус устя тріщини витримували не більше 0,5 мм. Вигин балочки здійснювали моментом сили P , прикладеної в площині балочки (рис. 9.9).

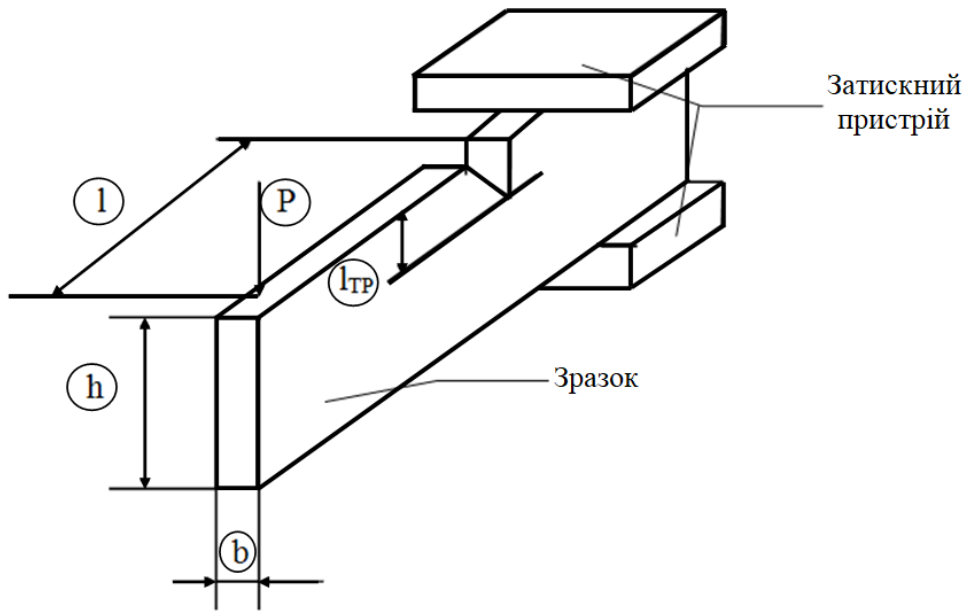


Рис. 9.9. Схема вигину балочки моментом сили P , прикладеної в площині балочки

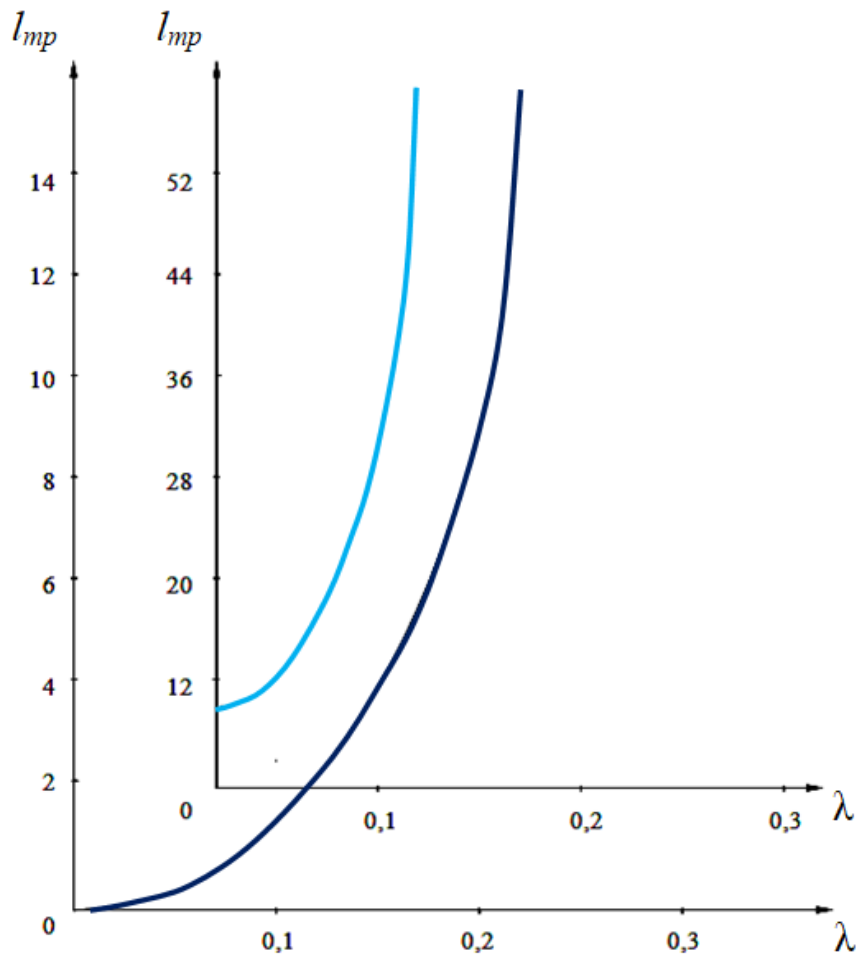


Рис. 9.10. Функція відносної довжини тріщини, $f(\lambda)$

Ефективну поверхневу енергію визначають за формулою

$$\gamma = \frac{\pi P^2 B^2 f(\lambda)}{E h^3 H}, \tag{9.28}$$

де B – плече дії навантаження P , см; H – товщина зразка, см; h – висота зразка, см; $\lambda = l_{mp} / h$ – відносна довжина тріщини; $f(\lambda)$ – функція відносної довжини тріщини; E – модуль пружності (рис. 9.10).

Для проведення досліджень були підготовлені 5 партій із 10-ма зразками в кожній. Обробку зразків залістистих кварцитів ПР здійснювали шляхом замочування їх на певний час у воді і розчинах ПАР [120].

На рис. 9.11 наведені результати стендових досліджень впливу бурових агентів на ефективну поверхневу енергію залістистих кварцитів.

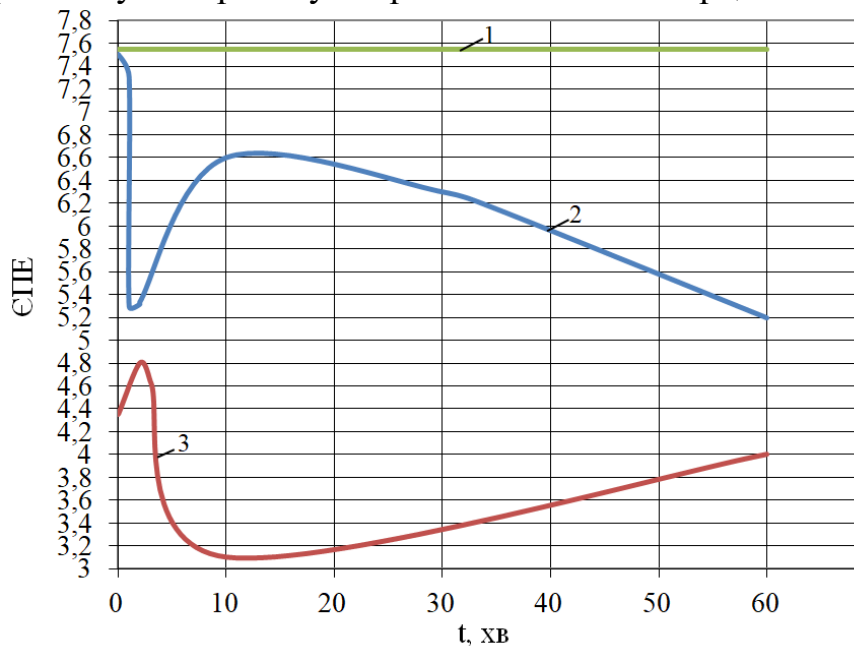


Рис. 9.11. Вплив часу просочення буровими агентами досліджуваних зразків на ефективну поверхневу енергію залістистих кварцитів: 1 – на повітрі; 2 – при змочуванні водою; 3 – змочування розчином феноксола

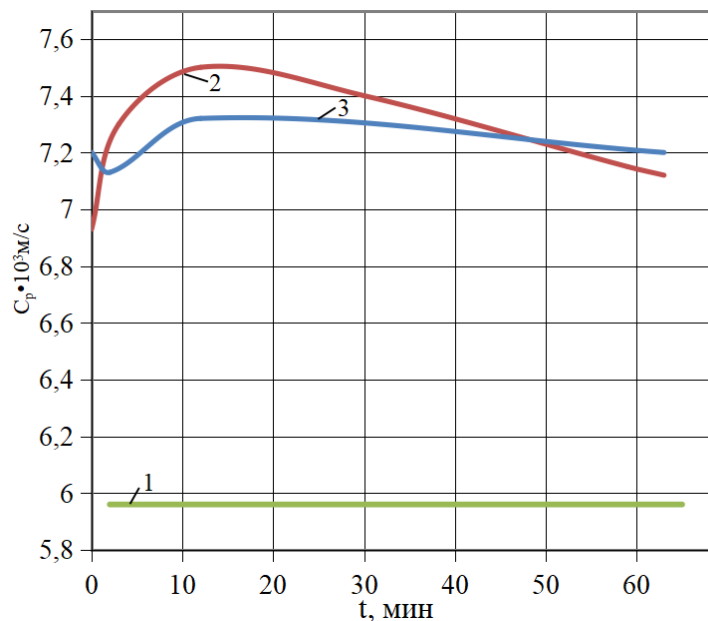


Рис. 9.12. Вплив часу просочення буровими агентами досліджуваних зразків на швидкість поширення пружних хвиль в залістистих кварцитах: 1 – на повітрі; 2 – при змочуванні водою; 3 – при змочуванні розчином ПАР

Сухі і зволожені зразки залізистих кварцитів піддавали випробуванням на приладі УК-14Р, де визначали швидкість поширення пружних хвиль (рис. 9.12).

Аналіз отриманих результатів дозволяє зробити висновок про те, що ПР впливають на зниження ефективної поверхневої енергії залізистих кварцитів. Причому встановлено, що вплив адсорбційно активних речовин не обмежується кількісним ефектом, але і проявляється в якісній зміні механічних властивостей ГП. Найбільших результатів можна досягти при застосуванні ПР близьких за молекулярною природою до ГП, що, без певного методичного обґрунтування, складно реалізувати при бурінні і експлуатації свердловин [121].

Досить істотну роль при руйнуванні ГП грає просочення їх ПР. Основними шляхами проникнення середовища в зону контакту «породоруйнівний інструмент - гірська порода» є тріщини зони передруйнування.

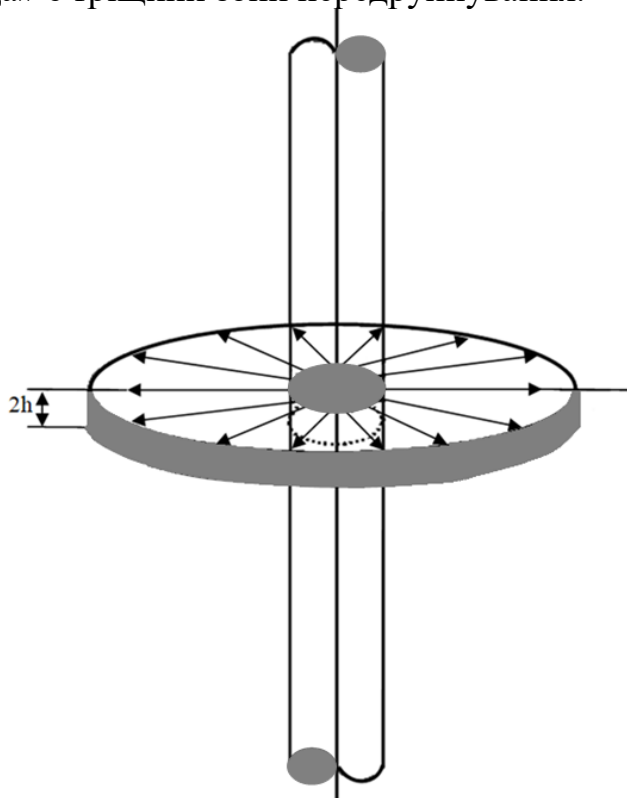


Рис. 9.13. Схема радіальної течії ПР по тріщинам в масиві ГП

Розглянемо транспортний механізм кінетичного аспекту прояву ефекту адсорбційного зниження міцності ГП, суть якого полягає в тому, що активне середовище повинно весь час бути присутнім в зоні руйнування [81]. Виділяють наступні механізми, що визначають лімітуючу стадію транспорту:

- в'язка течія активної рідини по тріщині, як капіляру;
- подолання активаційного бар'єру розвитку тріщини за участі активного середовища в хімічному розщепленні зв'язків;
- положення, за якого джерело рідкого середовища максимально наближено до зони руйнування;
- зв'язок кінетики механізму транспортування і руйнування з дифузійними процесами зростання пор на межах зерен за повільної деформації пластичних матеріалів.

Серед найбільш важливих факторів, які обумовлюють ефективність проникаючої дії ПР, слід виділити їх реологічні властивості, хімічну природу і розміри частинок окремих компонентів.

Для вирішення проблеми вибору типу ПР з високими проникаючими властивостями була використана плоска задача течії рідини по тріщинах (рис. 9.13) [122]. Законам руху різних типів ПР при бурінні свердловин різного призначення найбільш відповідають дисперсні системи, для яких зв'язок між напруженою зсуву і градієнтом швидкості може бути описаний наступним виразом

$$\tau = k \left(\frac{d\vartheta}{dy} \right)^n, \quad (9.29)$$

де k – коефіцієнт, який є мірою консистентності рідини; n – показник, що визначає ступінь відхилення гідравлічних характеристик рідини від властивостей класичної ньютонівської; k і n – постійні величини для даної досліджуваної рідини (ПР).

Розглянемо рівняння руху рідини по тріщині відповідно до рівняння (9.29). Елементарна сила опору в цьому випадку набуде вигляду [123]

$$dF_{on} = 2 \cdot k \cdot \left(\frac{d\vartheta}{dy} \right)_{y=h} dx. \quad (9.30)$$

Використовуючи умову прилипання рідини на стінках тріщини, де опір є максимальним

$$\left(\frac{d\vartheta}{dy} \right)_{y=h} = \frac{3 \cdot \vartheta}{h}, \quad (9.31)$$

та підставляючи (9.31) в (9.30), а потім інтегруючи результат, отримаємо

$$F_{on} = 2 \cdot k \cdot (-1)^n \frac{3^n \cdot \vartheta^n}{h^n} \cdot x. \quad (9.32)$$

Таким чином, отримують наступний закон руху рідини:

$$2 \cdot \rho \cdot h \cdot x \cdot \ddot{x} = 2 \cdot h \cdot P_o - 2 \cdot (-1)^k \frac{k \cdot 3^n \cdot x \cdot x^n}{h^n} \quad (9.33)$$

де P_o – тиск на вході в плоску тріщину; ρ – густина досліджуваної рідини; $2h$ – ширина розкриття тріщини.

Підстановка $\ddot{x} = u$ перетворює диференціальне рівняння (9.33) на такий вигляд

$$u \cdot \frac{du}{dx} = \frac{b}{x} - a \cdot u^n \cdot (-1)^n, \quad (9.34)$$

$$b = \frac{P_o \cdot D}{\rho}, \quad a = \frac{(-1)^n \cdot 3^n \cdot k}{h^{n+1} \cdot \rho \cdot \pi}. \quad (9.35)$$

Із врахуванням радіального руху рідини по тріщині, рівняння другого закону Ньютона для змінної маси приймає вид

$$m(x) \ddot{x} = 2 \cdot \pi \cdot D \cdot h \cdot P_o - \frac{2 \cdot (-1)^n \cdot 3^n \cdot x \cdot (x)^n}{h^n}. \quad (9.36)$$

Після деяких нескладних перетворень

$$u \cdot \frac{du}{dx} = \frac{b}{x^2} - \frac{a \cdot u^n \cdot (-1)^n}{x}. \quad (9.37)$$

Була зроблена спроба отримати точні рішення диференціального рівняння (9.37) у випадках, коли $n = 2$ і 4 .

Випадок $n = 2$. Диференціальне рівняння (9.37) набуде вигляду

$$u \cdot \frac{du}{dx} = \frac{b}{x} - a \cdot u^2. \quad (9.38)$$

Підстановка $U^2 = Z$ перетворює диференціальне рівняння (9.38) в лінійне диференціальне рівняння, після інтегрування якого, отримаємо

$$u = \pm \sqrt{2 \cdot b \cdot e^{-2ax} \int x^{-1} \cdot e^{2ax} \cdot dx + C_1 \cdot e^{-2ax}}, \quad (9.39)$$

$$t + C_2 = \pm \int \frac{dx}{\sqrt{2 \cdot b \cdot e^{-2ax} \int x^{-1} \cdot e^{2ax} \cdot dx + C_1 \cdot e^{-2ax}}}, \quad (9.40)$$

де C_1 , и C_2 – довільні постійні інтегрування.

Випадок $n = 4$.

Підстановка $U^2 = Z$ перетворює диференціальне рівняння (9.38) до виду

$$\frac{dZ}{dx} + 2 \cdot a \cdot Z^2 - \frac{2 \cdot b}{x} = 0. \quad (9.41)$$

Підстановка $Z = (2a)^{-1} Z_1$ перетворює диференціальне рівняння (9.41) до виду

$$Z_1' + Z_1^2 - \frac{4 \cdot a \cdot b}{x} = 0. \quad (9.42)$$

Підстановка виразу $Z_1 = V^1 V^{-1}$ перетворює диференціальне рівняння (9.42) до виду

$$V'' - \frac{4 \cdot a \cdot b}{x} \cdot V = 0, \quad (9.43)$$

Загальне рішення останнього рівняння має вигляд

$$V_1 = C_1 \cdot U_1 \cdot (4 \cdot i \cdot \sqrt{a \cdot b \cdot x^{-1}}) + C_2 \cdot Y_1(\dots), \quad (9.44)$$

де U_1 , Y_1 – функції Бесселя.

$$u = \pm \sqrt{\frac{\left\{ \sqrt{x} \left(C_1 U_1 \left(4 \cdot i \cdot \sqrt{a \cdot b \cdot x^{-1}} \right) + C_2 \cdot Y_1(\dots) \right) \right\}'}{2 \cdot a \cdot \sqrt{x} \left(C_1 U_1 \left(4 \cdot i \cdot \sqrt{a \cdot b \cdot x^{-1}} \right) + C_2 \cdot Y_1(\dots) \right)}}, \quad (9.45)$$

$$t + C_3 = \pm \sqrt{2 \cdot a} \int \frac{dx}{\sqrt{\frac{\left\{ \sqrt{x} \left(C_1 U_1 \left(4 \cdot i \cdot \sqrt{a \cdot b \cdot x^{-1}} \right) + C_2 \cdot Y_1(\dots) \right) \right\}'}{\sqrt{x} \left(C_1 U_1 \left(4 \cdot i \cdot \sqrt{a \cdot b \cdot x^{-1}} \right) + C_2 \cdot Y_1(\dots) \right)}}}, \quad (9.46)$$

де C_1 , C_2 , C_3 – довільні постійні інтегрування.

Розглянемо ще один випадок, коли $n = 2$. При цьому рівняння (9.38) набуде вигляду

$$u \cdot \frac{du}{dx} = \frac{b}{x^2} - \frac{a \cdot u^2}{x}, \quad (9.47)$$

Підстановка $U^2 = Z$ перетворює диференціальне рівняння в лінійне диференціальне рівняння, інтегруючи яке при $a \neq \frac{1}{2}$ отримуємо наступний результат [95 - 96].

$$u = \pm \sqrt{\frac{2 \cdot b}{(2 \cdot a - 1) \cdot x} + C_1 \cdot x^{-2a}}, \quad (9.48)$$

$$t + C_2 = \pm \sqrt{2 \cdot a} \int \frac{dx}{\sqrt{\frac{2 \cdot b}{(2 \cdot a - 1) \cdot x} + C_1 \cdot x^{-2a}}}. \quad (9.49)$$

При $a = \frac{1}{2}$ отримуємо наступний результат

$$u = \pm \sqrt{\frac{1}{x} (2 \cdot b \cdot \ln x + C_1)}, \quad (9.50)$$

$$t + C_2 = \pm \int \frac{dx}{\sqrt{\frac{1}{x} (2 \cdot b \cdot \ln x + C_1)}}. \quad (9.51)$$

Випадок $n = 4$.

Підстановка $U^2 = Z$ перетворює диференціальне рівняння (9.38) до виду

$$\frac{dZ}{dz} + \frac{2 \cdot a \cdot Z^2}{x} - \frac{2 \cdot b}{x^2} = 0. \quad (9.52)$$

Підстановкою $Z = \varphi(x)Z_1$ ми перетворюємо диференціальне рівняння (9.52) до виду

$$\frac{dZ_1}{dx} + \frac{\varphi'(x)}{\varphi(x)} \cdot Z_1 + \frac{2 \cdot a \cdot \varphi(x)}{x} \cdot Z_1^2 - \frac{2 \cdot b}{x^2 \cdot \varphi(x)} = 0. \quad (9.53)$$

Вибравши в диференціальному рівнянні (9.53) $\varphi(x) = \frac{x}{2 \cdot a}$, отримуємо

$$\frac{dZ_1}{dz} + \frac{1}{x} \cdot Z_1 + Z_1^2 \frac{4 \cdot a \cdot b}{x^3} = 0. \quad (9.54)$$

Підстановка $Z_1 = Z_2 + \psi(x)$ перетворює диференціальне рівняння (9.54) до виду

$$\frac{dZ_2}{dz} + \left(\frac{1}{x} + 2 \cdot \Psi \right) \cdot Z_2 + Z_2^2 + \Psi' + \frac{1}{x} \cdot \Psi + \Psi^2 - \frac{4 \cdot a \cdot b}{x^3} = 0, \quad (9.55)$$

Вибравши в диференціальному рівнянні (9.56) $\Psi = \frac{1}{2}x$ отримаємо

$$\frac{dZ_2}{dz} + Z_2^2 + \frac{1}{4 \cdot x^2} - \frac{4 \cdot a \cdot b}{x^3} = 0. \quad (9.56)$$

Підстановка $Z_2 = V' \cdot V'^{-1}$ перетворює диференціальне рівняння (9.56) до виду

$$V'' + \left(\frac{1}{4 \cdot x^2} - \frac{4 \cdot a \cdot b}{x^2} \right) \cdot V = 0. \quad (9.57)$$

За допомогою рішення диференціального рівняння (9.57), остаточно одержуємо наступний результат

$$u = \pm \sqrt{\frac{x}{2 \cdot a}} \left\{ \frac{\left[\sqrt{x} \left(C_1 \cdot U_0 \left(4 \cdot i \cdot \sqrt{\frac{a \cdot b}{x}} \right) + C_2 \cdot Y_0(\dots) \right) \right]'}{\sqrt{x} \left(C_1 \cdot U_0 \left(4 \cdot i \cdot \sqrt{\frac{a \cdot b}{x}} \right) + C_2 \cdot Y_0(\dots) \right)} - \frac{1}{2 \cdot x} \right\}^{\frac{1}{2}}, \quad (9.58)$$

$$t + C_3 = \pm \sqrt{2 \cdot a} \int \frac{dx}{\sqrt{\sqrt{x} \left\{ \frac{\left[\sqrt{x} \left(C_1 \cdot U_0 \left(4 \cdot i \cdot \sqrt{\frac{a \cdot b}{x}} \right) + C_2 \cdot Y_0(\dots) \right) \right]'}{\sqrt{x} \left(C_1 \cdot U_0 \left(4 \cdot i \cdot \sqrt{\frac{a \cdot b}{x}} \right) + C_2 \cdot Y_0(\dots) \right)} - \frac{1}{2 \cdot x} \right\}^{\frac{1}{2}}}}, \quad (9.59)$$

де C_1, C_2, C_3 – довільні постійні інтегрування.

Можемо констатувати, що вперше запропоновані нові точні рішення наведених рівнянь (9.58 і 9.59) у випадках, якщо n дорівнює 2 і 4.

В результаті аналізу літературних джерел і проведених авторами теоретичних і експериментальних досліджень було встановлено, що рушійними силами проникнення ПР в зону передруйнування можуть бути сили хімічної взаємодії, адсорбційні явища, а також зовнішні механічні дії (вібрації), електричні і магнітні поля [14].

Відома велика кількість робіт, присвячених різним способам дії рідких середовищ на гірський масив, наприклад, розроблено математичну модель для визначення частот власних коливань навколосвердловинних об'ємів масиву, встановлені закономірності зміни напруги поблизу стовбура свердловини і аналітично визначений радіус динамічної дії, а також встановлені аналітичні зале-

жності, що зв'язують основні геометричні і гідродинамічні параметри генераторів імпульсів з фізико-механічними властивостями перебудованого масиву, глибиною залягання і потужністю пластів ГП. В результаті гідроімпульсної дії в гірському масиві створюються хвилі напруги стискування – розтягування, що призводять або до створення мережі штучних тріщин, або до глибшого проникнення рідини в пори і тріщини масиву порід. Незважаючи на шкідливість кавітації, наприклад, при експлуатації гідромашин, вона може бути використана як корисне явище для інтенсифікації виробничих процесів спорудження і експлуатації свердловин різних груп.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 9

1. Встановлено, що за допомогою поляризаційно-оптичного методу можна визначити вплив промивних рідин на характер розмежування внутрішніх напружень і пов'язаних з ними деформацій.

2. Запропоновано використовувати для оцінки впливу промивних рідин на процес зародження і розвитку тріщин відриву та зсуву коефіцієнт інтенсивності напружень при вершині тріщини.

3. Встановлено, що введення поверхнево-активних речовин та органічних сполук до складу промивальних рідин, величина потенціалу іонізації яких дорівнює потенціалу іонізації, до прикладу, залізистих кварцитів, забезпечує зниження статичної та динамічної міцності на 25 - 54%.

4. Зазначено, що вплив водних розчинів деяких поверхнево-активних речовин на мікротвердість, в даному випадку, залізистих кварцитів дещо менший, ніж при вдавлюванні штампа.

5. Показано, що термодинамічні та кінетичні аспекти є важливою умовою ефекту адсорбційного зниження міцності залізистих кварцитів. Зазначено, що при бурінні свердловин має місце змішаний прояв термодинамічного та кінетичного аспектів.

6. Встановлено, що промивальні рідини можуть сприяти зниженню ефективної поверхневої енергії і мають істотний вплив, пов'язаний із зменшенням енергетичних показників руйнування гірських порід, а саме в межах 15 - 70%.

РОЗДІЛ 10. ДОСЛІДЖЕННЯ МАСТИЛЬНИХ І ПРОТИЗНОСНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЦИРКУЛЮЮЧИХ ПРОМИВАЛЬНИХ РІДИН. ДЕЯКІ АСПЕКТИ ЕКОЛОГІЇ ПРИ БУРІННІ СВЕРДЛОВИН

10.1 Промивальні рідини з покращеними мастильними властивостями

Відмітимо, що застосування значного числа ПР з поліпшеними мастильними властивостями в процесах буріння (а більш ширше – при закінчуванні і експлуатації) свердловин, неможливо без попередніх лабораторних досліджень наслідків прояву некерованості таких факторів, обумовлюючих рух рідин, як неоднорідність ГП, коливання БІ і багатьох інших [124].

Отже, з огляду на зазначене вище, лабораторні методи дослідження рідин, на відповідність конкретним критеріям технологічних характеристик, повинні відповідати таким основним вимогам:

- 1) відтворювати енергетичне навантаження взаємодіючих тіл;
- 2) відтворювати умови охолодження і змащення;
- 3) відтворювати властивості і характер взаємодіючих тіл.

Всі машини і пристрої, призначені для оцінки мастильних властивостей ПР доцільно класифікувати за такими основними ознаками:

- 1) за умовами охолодження і змащення взаємодіючих зразків;
- 2) за схемою взаємодії;
- 3) за напруженістю роботи взаємодіючих зразків.

Всю багатоманітність факторів, які впливають на рівень прояву мастильних і протизносних властивостей ПР слід розділити на такі великі групи:

- 1) фактори, обумовлені виключно складом і властивостями дисперсійного середовища і дисперсної фази;
- 2) фактори, що неодмінно пов'язані з умовами застосування.

Розглянемо фактори, прояв яких обумовлений складом і властивостями дисперсійного середовища і дисперсної фази. Для з'ясування поставлених питань створено ряд машин тертя, призначенням яких виступає лабораторне випробування мастил; до означених машин можна віднести такі наступні: чотирьохкулькова, Фалекс, Тімкен, Олмен-Віланд, SAE [14]. Типи випробувальних зразків, що застосовуються на цих машинах різні. Для чотирьохкулькових машин тертя використовуються стандартні кульки (рис. 10.1, а), для Тімкен – зовнішнє кільце конічного роликопідшипника і брусок прямокутного перетину (рис. 10.1, б), Фалекс – циліндричний брусок (рис. 10.1, в), Олмен-Віланд – циліндричний ролик і дві колодки, що охоплюють його (у вигляді підшипникових вкладишів) (рис. 10.1, г), SAE – два підшипникових кільця таких же, як на машині тертя Тімкен (рис. 10.1, д).

Дані (відносно змащувальних властивостей ПР), що розглядаються в даній роботі, отримані при застосуванні машини тертя, яка є дещо вдосконаленою конструкцією приладу Тімкен за назвою МТП (рис. 10.2).

Технологія проведення означених нами випробувань полягала в наступному. Поверхні тертя зразка досліджуваної ГП і сталевого диска зачищали шліфу-

вальною шкуркою і обробляли етиловим спиртом. Потім, включивши електродвигун машини тертя, встановлювали, за допомогою спеціального автотрансформатора, потужність холостого ходу ($W_{x.x.}$), що дорівнює 100 Вт. Сталевий диск занурювали в ємність з буровим промивальним агентом (ПР), після чого до нього притискали зразок ГП, плавно опутивши важіль з підвішеним вантажем. Через 2 хвилини, після встановленого режиму тертя, знімали відлік за контрольним ватметром (W).

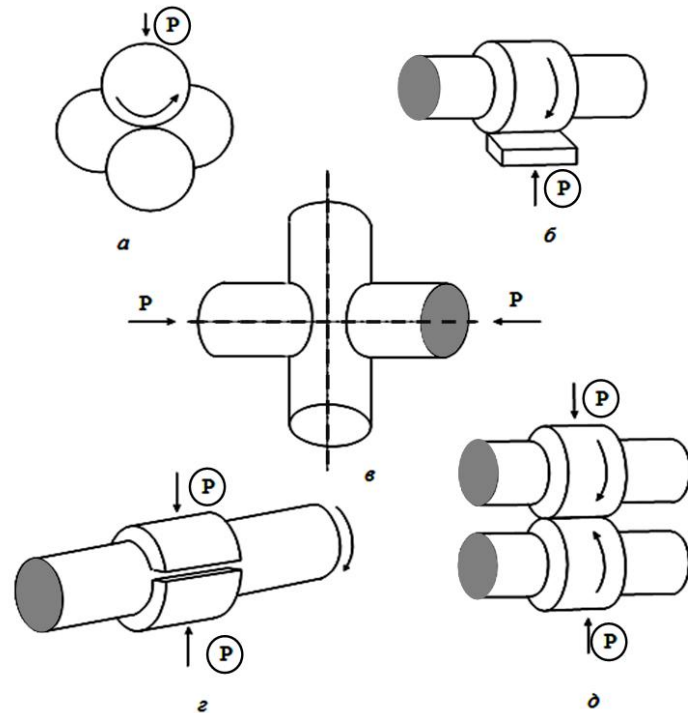


Рис. 10.1. Типи випробувальних зразків лабораторних машин тертя: *a* – чотирьохкулькова; *б* – Тімкен; *в* – Фалекс; *г* – Олмен-Віланд; *д* – SAE (P – навантаження)

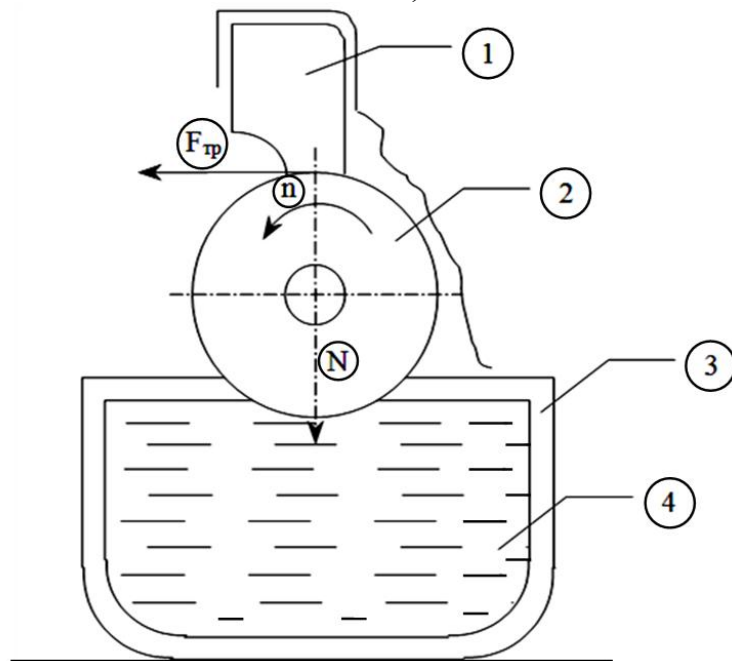


Рис. 10.2. Схема машини тертя МТП: 1 – зразок ГП; 2 – сталевий диск; 3 – ємність; 4 – випробовуваний буровий агент (ПР)

Коефіцієнт тертя розраховували за формулою

$$f_{тер} = 9,55 \frac{W_0 \eta}{RNn}, \quad (10.1)$$

де η – к.к.д. зубчастої передачі розглядуваної машини, % ($\eta = 98\%$); R – радіус сталевго диска; N – нормальне зусилля притиснення зразка ГП до сталевго диска; n – частота обертання сталевго диска; W_0 – потужність на валу електродвигуна, що визначається за наступною формулою

$$W_0 = W - W_{x.x.} \quad (10.2)$$

де W – потужність, споживана електродвигуном розглядуваної машини при навантаженому диску.

Результати проведених нами досліджень мастильної здатності деяких типів ПР наведені в табл. 10.1.

Таблиця 4.1

Мастильні властивості деяких розповсюджених типів ПР, що визначені на машині тертя МТП

Промивальна рідина		Коефіцієнт тертя сталі по залістому кварциту	
Основа	Добавка		
	назва	кількість, %	тові
Технічна вода	-	-	0,52
Технічна вода	Сульфонол	0,05	0,48
		0,10	0,36
		0,15	0,29
	Катапін	0,10	0,49
		0,25	0,40
		0,50	0,34
	ОП-10	0,10	0,38
		0,25	0,29
		0,50	0,26
	Феноксол ВІС-15	0,10	0,39
		0,25	0,30
		0,50	0,026
	Суміш сульфонола та ОП-10 (1:1)	0,10	0,5
		0,25	0,28
		0,50	0,22
	Талове масло	0,50	0,39
		1,00	0,28
		2,00	0,16
	Кістковий жир	0,50	0,42
		1,00	0,34
		2,00	0,29
Нафта	2,00	0,42	
	4,00	0,34	
	8,00	0,29	

Промивальна рідина		Коефіцієнт тертя сталі по залізистому кварциту	
Основа	Добавка		
	назва	кількість, %	
Глинистий розчин (6% водна суспензія бентонітової глини)	-	-	0,46
Глинистий розчин (6% водна суспензія бентонітової глини)	Сульфонол	0,25	0,46
		0,50	0,45
		1,00	0,43
	Катапін	0,25	0,46
		0,50	0,45
		1,00	0,45
	ОП-10	0,25	0,45
		0,50	0,42
		1,00	0,42
	Феноксол ВІС-15	0,25	0,42
		0,50	0,36
		1,00	0,35
	Суміш сульфонола та ОП-10 (1:1)	0,25	0,38
		0,50	0,36
		1,00	0,32
	Талове масло	0,50	0,27
		1,00	0,21
		2,00	0,18
	Кістковий жир	0,50	0,36
		1,00	0,34
		2,00	0,26
Нафта	2,00	0,36	
	4,00	0,28	
	8,00	0,22	

Аналіз отриманих даних дозволив зробити висновок про те, що вибірково адсорбуються на поверхнях, які труться, речовини зі складу ПР, у той же час вони забезпечують значне зниження коефіцієнта тертя [125].

На підставі отриманих ґрунтовних експериментальних результатів були розроблені деякі рецептури ПР для різних геолого-технічних умов спорудження свердловин [46], найбільш ефективним серед яких є буровий розчин на водній основі, що містить ПАР (сульфонол або оксиетилірований алкілфенол, і політетрафторетилен в співвідношенні від 1:1 до 1:2). Для умов спорудження свердловин, де в розрізі зустрічаються підземні води з мінералізацією понад 4 мг-екв/л слід застосовувати в складі бурового агента неіоногенну ПАР – оксиетилірований алкілфенол, а в решті випадків іоногенну ПАР – сульфонол. Для підвищення мастильної здатності бурового агента ПАР слід вводити в його склад попередньо змішавши з політетрафторетиленом у співвідношенні від 1:1 до 1:2.

Причому, при низьких і середніх контактних навантаженнях пар, що труться, слід застосовувати порошок політетрафторетилена, а при значних – емульсію політетрафторетилену, рівномірно розподілену в ацетальному полімері. Антифрикційна добавка вводиться в циркулюючий буровий розчин в кількості 0,5 - 2,0 масових відсотків.

В даний час, в практиці спорудження глибоких свердловин різного призначення, досить широко застосовують, окрім доліт типу PDC, шарошкові долота, ефективність роботи яких залежить не тільки від технічного стану озброєння долота, а й від типу виконання його опорного вузлу, що представляє собою спеціального виконання підшипник ковзання або кочення. Беззаперечно має певний практичний інтерес розгляд питань тертя і зносу стосовно опори шарошкового долота. Відомо, що метою збільшення несучої здатності опорних підшипників при малих швидкостях, або поліпшення їх динамічних властивостей і ступеню охолодження, в техніці вдаються до змащення під тиском, яке обумовлено гідродинамічним ефектом, а означений режим змащення розглядають як гідродинамічний. В якості мастила можна з успіхом використовувати як рідини, так і гази. Розрахунок гідростатичних підшипників в цьому випадку полягає у визначенні розподілу тисків, обумовлених або заданим дебітом, або відомим тиском мастила [118].

Якщо не приймати до уваги вплив інерційних сил на рух в шарі мастила, причому це цілком припустимо в заданих умовах, то диференціальне рівняння для тиску запишеться у вигляді

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(h^3 \frac{\partial P_1}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(h^3 \frac{\partial P_1}{\partial z} \right) = 0. \quad (10.3)$$

Для наведеного рівняння прийнята система координат, що зазвичай використовуються для вирішення системних задач змащування. Вісь z є нормальною до контактних поверхонь, параметр h виступає лінійною характеристикою прошарку мастила, а P_1 визначається наступним чином:

$$P_1 = P^{1/\chi+1}, \quad (10.4)$$

де в разі використання газів $\chi = 1$, а в разі використання рідин $\chi = \infty$.

Представимо величину P_1 у вигляді

$$P_1 = \sum f_{1m}(x) f_{2m}(z), \quad (10.5)$$

та при підстановці (10.5) в рівняння (10.3), отримуємо систему наступних звичайних диференціальних рівнянь [126]

$$\begin{cases} \frac{d^2 f_{1m}}{dx^2} + \frac{3}{h} \frac{\partial h}{\partial x} \frac{df_{1m}}{dx} + \chi_m f_{1m} = 0, \\ \frac{d^2 f_{2m}}{dz^2} + \frac{3}{h} \frac{\partial h}{\partial z} \frac{df_{2m}}{dz} - \chi_m f_{2m} = 0, \end{cases} \quad (10.6)$$

де через χ_m позначена константа поділу.

Зазвичай $\frac{\partial h}{\partial z} = 0, h(x, z) = Ch_1(x)$. Таким чином, система (10.6) набуває наступного вигляду

$$\begin{cases} \frac{d^2 f_{1m}}{dx^2} + \frac{3}{h_1(x)} \frac{\partial h_1(x)}{dx} \frac{df_{1m}}{dx} + \chi_m f_{1m} = 0, \\ \frac{d^2 f_{2m}}{dz^2} - \chi_m f_{2m} = 0, \end{cases} \quad (10.7)$$

Вибір $h_1(x)$, допускає точні рішення першого рівняння системи (4.7), які здійснюються при $A > 0$; $A < 0$ та $\chi_m + A > 0$; $A < 0$ та $\chi_m + A < 0$; $A < 0$ та $\chi_m = -A$; $A = 0$; $B = C = 0$ та $\frac{1}{4} - \frac{C}{a^2} > 0$; $A = B = 0$ та $\frac{1}{4} - \frac{C}{a^2} < 0$; $A = B = 0$ та $C = 0,25$; $B = C = 0$ та $A > 0$; $B = C = 0$, $A < 0$ та $\chi_m + A > 0$; $B = C = 0$, $A < 0$ та $\chi_m + A < 0$; $B = C = 0$ та $\chi_m = -A$; $A = B = C = 0$ та ін.

Наведемо точне рішення першого рівняння системи (4.7) для умови $A > 0$

$$\begin{aligned} h_1(x) &= h_{10}(ax+b)^{\frac{2}{3}\sqrt{\frac{1-c}{4} + \frac{1}{a^2}}} \exp\left(-\frac{2i\sqrt{A}}{3a}(ax+b)\right) * \\ &* \left(C_1 \Phi_k \left(\sqrt{\frac{1-c}{4} - \frac{c}{a^2}} + \frac{B_i}{2a\sqrt{A}} + \frac{1}{2}, 2\sqrt{\frac{1-c}{4} - \frac{c}{a^2}} + 1; \frac{2l\sqrt{A}}{a}(ax+b) \right) + C_2 \Psi_k(\dots) \right)^{\frac{2}{3}}, \\ f_{1m} &= h_{10}^{\frac{3}{2}} \exp\left(-\frac{i}{a}(ax+b)\left[\sqrt{\chi_m + A} - \sqrt{A}\right]\right) * \\ &* \left(\tilde{C}_1 \Phi_k \left(\sqrt{\frac{1-c}{4} - \frac{c}{a^2}} + \frac{B_i}{2a\sqrt{\chi_m + A}} + \frac{1}{2}, 2\sqrt{\frac{1-c}{4} - \frac{c}{a^2}} + 1; \frac{2l\sqrt{\chi_m + A}}{a}(ax+b) \right) + \tilde{C}_2 \Psi_k(\dots) \right) * \\ &* \left(C_1 \Phi_k \left(\sqrt{\frac{1-c}{4} - \frac{c}{a^2}} + \frac{B_i}{2a\sqrt{A}} + \frac{1}{2}, 2\sqrt{\frac{1-c}{4} - \frac{c}{a^2}} + 1; \frac{2l\sqrt{A}}{a}(ax+b) \right) + C_2 \Psi_k(\dots) \right)^{-1} \end{aligned}$$

Отже, можна отримати задовільну апроксимацію (10.7) шляхом підстановки замість дійсного розподілу тисків схематичне, наприклад, лінійний розподіл – починаючи з тиску на вході і закінчуючи в навколишньому просторі на межі підшипника. У загальному випадку, однак, необхідно і корисно вміти розраховувати якомога точніше розподіл тиску, від якого залежить не тільки несуча здатність підшипника, але і товщина шару мастила, що визначається його дебітом, який залежить від тиску. Випадок змінної товщини h є цікавим особливо для радіальних підшипників, змащуваних під тиском. При цьому, якщо вал ексцентричний по відношенню до вкладиша підшипника, то з'являється асиметрія розподілу тисків уздовж окружності підшипника і в той же час виникає результуюча тисків, спрямована назустріч навантаженню.

З метою максимального наближення до умов тертя, що мають місце в опорах доліт, мастильну здатність бурових агентів додатково досліджували на чотирьохкульковій машині тертя ЧКМ, основним вузлом якої є піраміда з трьома нерухомими і однією рухомою кульками (рис. 10.1, а).

Сутність випробувань полягала в наступному. У вузол тертя заливали досліджуваний буровий агент, далі приводили в обертання шпиндель із закріпле-

ною в ньому верхньою кулею, а нижні кулі притискали до верхньої із заданим зусиллям. Випробування проводили при ступінчастому збільшенні навантаження протягом однієї хвилини. Величина кожного ступеня навантажування складала 100 Н. У дослідженнях використовували кульки діаметром 8 мм, виготовлені зі сталі марки 55 СМА.

Мастильну здатність ПР оцінювали за граничним руйнівним навантаженням зварювання кульок, ступеня зношування кульок і граничної міцності мастильних плівок, яку визначали з виразу [14]

$$\sigma_{np} = \frac{N_1}{S_1}, \quad (10.8)$$

де N_1 – нормальна складова сили P , попередня зварювання кульок; S_1 – середня площа плям зносу.

$$S_1 = \frac{\pi d_{1сep}^2}{4}, \quad (10.9)$$

$$N_1 = 0,41P_1, \quad (10.10)$$

де $d_{1сep}$ – середній діаметр плям зносу в дослідженні, що передуює зварюванню кульок; P_1 – навантаження на верхній шар мастила.

Отже, остаточно маємо

$$\sigma_{np} = \frac{4 \cdot 0,41P_1}{\pi d_{1сep}^2} = \frac{52,5P_1}{d_{1сep}^2}. \quad (10.11)$$

У табл. 10.2 наведені результати лабораторних досліджень впливу ПР на зношування сталевих куль і граничну міцність мастильних плівок. Помилка у визначенні результатів досліджень не перевищувала 5%.

Таблиця 10.2

Мастильні властивості деяких широкозастосовуваних ПР, визначені на чотирьохкульковій машині тертя

Промивальна рідина			Навантаження зварювання куль, Н	Гранична міцність мастильної плівки, МПа
Основа	Добавка			
	Найменування	Вміст, %		
Технічна вода	-	-	650	455
Технічна вода	Сульфонол	0,05	1750	120
		0,10	2150	145
		0,15	2400	160
	Катапін	0,10	700	110
		0,25	1100	120
		0,50	1300	120
	ОП-10	0,10	1500	640
		0,25	1600	750
		0,50	1650	800
	Феноксол ВІС-15	0,10	1400	165
		0,25	2000	300
		0,50	2400	480

Промивальна рідина		Навантаження зварювання куль, Н	Гранична міцність мастильної плівки, МПа	
Основа	Добавка			
	Найменування	Вміст, %		
Технічна вода	Суміш сульфону та ОП-10 (1:1)	0,10	1800	780
		0,25	2400	820
		0,50	2500	850
	Талове масло	0,50	1800	620
		1,00	2100	800
		2,00	2200	850
	Кістковий жир	0,50	1600	600
		1,00	2000	800
		2,00	2100	800
	Нафта	2,00	700	250
		4,00	1000	300
		8,00	1000	350
Глинистий розчин (7% водна суспензія бентонітової глини)	-	-	650	220
Глинистий розчин (6% водна суспензія бентонітової глини)	Сульфонол	0,25	700	240
		0,50	700	240
		1,00	700	240
	Катапін	0,25	650	240
		0,50	700	220
		1,00	700	220
	ОП-10	0,25	1800	820
		0,50	1800	820
		1,00	2000	900
	Феноксол ВІС-15	0,25	1700	800
		0,50	1800	840
		1,00	2100	900
	Суміш сульфону та ОП-10 (1:1)	0,25	1900	850
		0,50	2100	950
		1,00	2100	950
	Талове масло	0,50	2000	1620
		1,00	2000	1800
		2,00	2100	2250
	Кістковий жир	0,50	1600	1500
		1,00	2000	1600
		2,00	2000	1600
Нафта	2,00	900	350	
	4,00	1000	400	
	8,00	1000	420	

Аналіз отриманих даних дає підставу зробити наступні висновки: найбільш повно характеризує мастильну здатність бурових агентів (ПА) саме міцність мастильної плівки; в умовах високої контактної напруги більш ефективними добавками виявляються суміші жирів рослинного і тваринного походження з додаванням деяких ПАР [105].

10.2 Дослідження протизношувальних властивостей промивальних рідин

Промивальні рідини з високими мастильними властивостями не завжди сприяють зниженню зносу взаємодіючих в них тіл (пари «породоруйнівний інструмент - гірська порода», «бурильні труби - гірська порода», вузли тертя шарошкових доліт і ін.). Кількісна оцінка протизношувальних властивостей ПР можлива шляхом зіставлення окремих показників зношування тіл, відпрацьованих в їх середовищі [127].

Нині застосовують наступні показники зношування: швидкість; інтенсивність зносостійкість; відносна зносостійкість. Слід зазначити, що поряд з перерахованими, використовують і інші показники зношування, наприклад масовий знос, які мають індивідуальний, а не загальний характер.

Експериментальні дослідження проводили на установці, представленій схематично на рис. 10.3, при різних частотах обертання, зусиллях притискання і часу роботи, а також при промиванні водою і водними розчинами ПАР [128].

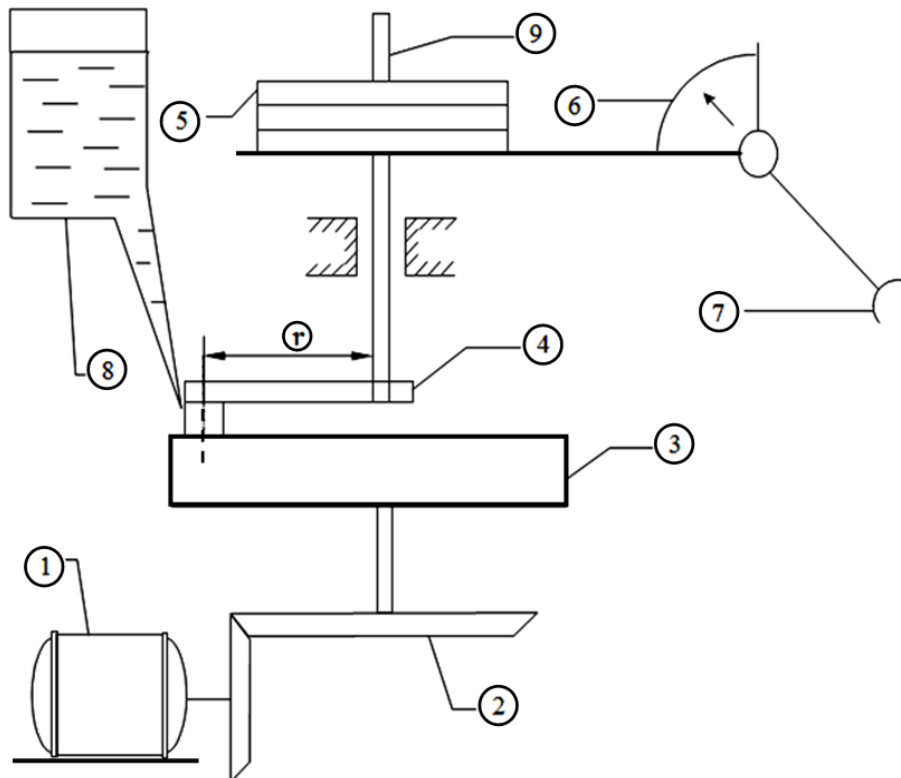


Рис. 10.3. Схема лабораторної установки для дослідження зносу пари тертя «породоруйнівний інструмент-гірська порода»: 1 – електродвигун; 2 – конічна пара шестерень; 3 – пристрій для кріплення зразка ГП; 4 – патрон; 5 – вантажі; 6 – вимірвальна шкала; 7 – реєструючий пристрій; 8 – ємність; 9 – шпиндель

Досліджуваний зразок ГП (в даному випадку мармур, пісковик і залістий кварцит) кріпили кернотримачем 3 в чаші машини. Електродвигуном 1 (через редуктор і конічну пару шестерень 2 зразок приводили в обертання. При цьому, сталевий штабик, закріплений в патроні машини тертя 4, притискали до зразка

ГП з певним зусиллям, створюваним набором вантажів 5. З ємності 8 здійснювали підведення робочого середовища з відомим вмістом добавок (ПАР). За попередньо відтарованою шкалою б брали відлік моменту тертя сталевого штабика та досліджуваної ГП [81].

Розрахунок коефіцієнта тертя, втрати маси та результату їх спільної дії, здійснювали за формулами:

$$\mu = \frac{M_{тер}}{F \cdot r}, \quad (10.12)$$

$$\omega = Q_1 - Q_2, \quad (10.13)$$

$$\omega \mu = \frac{M_{тер}}{F r} \cdot (Q_1 - Q_2). \quad (10.14)$$

Результати стендових досліджень наведені в табл. 10.3. Як показали дослідження, введення до складу промивальної рідини ПАР забезпечує значне зменшення зносу застосовуваного ПРІ [52].

Таблиця 10.3

Результати стендових досліджень зносостійкості ПРІ

Умови тертя	Гірська порода	Осьове зусилля, Н	Частота обертання, хв ⁻¹	Вага зразка твердого сплаву, г		ω	μ	ωμ
				до зносу, Q ₁	після зносу, Q ₂			
При промиванні водою	Залізистий кварцит	148	62	43,6	37,4	6,2	0,52	3,2
		148	102	43,5	34,8	7,8	0,52	4,5
		374	62	43,8	35,7	8,1	0,52	4,2
		374	102	43,5	33,6	9,9	0,52	4,0
При промиванні водним розчином ПАР	Залізистий кварцит	148	62	43,5	39,6	3,9	0,18	0,70
		148	102	43,8	40,3	3,5	0,18	0,63
		374	62	43,6	38,7	4,9	0,18	0,88
		374	102	43,5	40,5	3,0	0,18	0,54

Аналіз взаємодії ГП з буровим інструментом у процесах спорудження свердловин дає підставу вважати, що адсорбція викликає ефекти на зовнішніх і внутрішніх поверхнях деформованого твердого тіла. Проведені дослідження мастильної і протизношувальної здатності ПР підтверджують характер їх взаємодії з поверхнею металів. Так введення до їх складу масел рослинно-тваринного походження, що складаються з гліцеридів, які представляють собою суміш трьохатомного спирту гліцерину з вищими насиченими і не насиченими жирними кислотами, забезпечує зниження коефіцієнта тертя і зносу металу, причому вказане супроводжується появою кородуючого ефекту.

Більш активні, щодо окислення металів, нафтеніві кислоти. Питання про

корозію бурового інструменту в вуглеводневих розчинах жирних кислот вивчені недостатньо. Можна припустити, що на металевих поверхнях тертя, при високих температурах, хемосорбція переважає над фізичною адсорбцією. Причому, найбільша її інтенсивність спостерігається в місцях з порушенням стехіометричної решітки металу, наприклад, в місцях сторонніх включень.

10.3 Дослідження корозійної дії циркулюючих промивальних рідин при бурінні свердловин

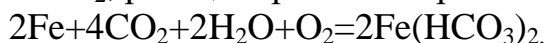
Залежно від цільового призначення бурових робіт, застосовуються різні типи ПР, які можуть призводити до корозії БІ. Відомо, що при хімічній корозії метал або сплав, взаємодіючи з газами або рідинами, утворює різні хімічні сполуки (оксиди, сульфіді і ін.), а потім, руйнуючись, переходить до неметалевого стану [129]. Швидкість корозії оцінюється втратою маси металу з одиниці його поверхні за одиницю часу. Процес руйнування починається з поверхні металу і поширюється вглиб. Для визначення корозії користуються терміном «глибинний показник швидкості корозії протягом року», а для оцінки корозійної стійкості складають класифікацію за групами і балам стійкості. У табл. 10.4 приведено існуючу класифікацію за групами стійкості металів.

Таблиця 10.4

Класифікація металів за групами стійкості

Група стійкості	Глибинні показники стійкості, мм/рік	Бал стійкості
1. Абсолютно стійкі	< 0,001	1
2. Вельми стійкі	0,001 - 0,005	2
3. Стійкі	0,005 - 0,01	3
	0,01 - 0,05	4
	0,05 - 0,1	5
4. Знижено стійкі	0,1 - 0,5	6
	0,5 - 1,0	7
5. Малостійкі	1,0 - 5,0	8
	5,0 - 10,0	9
6. Нестійкі	> 10,0	10

Мінеральні води, що містять CO₂ підвищеної концентрації, більш агресивно впливають на метали, прискорюють процес корозії і руйнування труб. Хімічна корозія з'являється внаслідок знаходження в воді CO₂, O₂, H₂S, HCl, Cl і H₂SO₄ в концентраціях, які обумовлюють поступове окислення металу. У газонасичених мінеральних водах інтенсивність корозії підвищується. У вуглекислій воді, зі значним вмістом CO₂, реакція протікає за рівнянням [130]

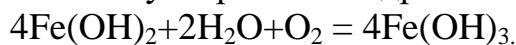


де $\text{Fe}(\text{HCO}_2)$ є нестійким з'єднанням, яке, в свою чергу, розпадається наступним чином:

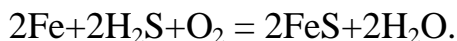


де $\text{Fe}(\text{OH})_2$ – гідрат закису заліза.

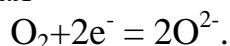
При тривалій дії води і кисню утворюється гідрат оксиду заліза – іржа



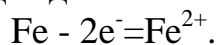
У сульфідній воді, в результаті впливу сірководню на метал, утворюється сірчисте залізо



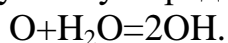
Кисень в поверхні розділу «рідина – повітря», як відомо, чинить найбільшу дію з окислення, відновлюючи метал



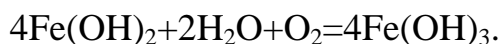
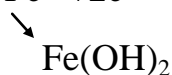
У хімічних реакціях метал віддає два зовнішніх електрона



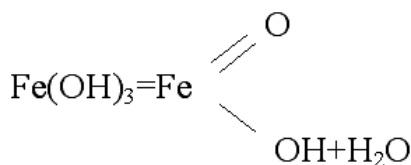
Анодний процес триває в наступному порядку



Потік іонів



Комплекс, що утворився, частково відщеплюючи воду, за складом відповідає іржі



Ефективним способом захисту бурового обладнання від корозії є застосування спеціальних речовин – інгібіторів, що додаються до промивальних/технологічних рідин при бурінні та експлуатації свердловин. Авторами роботи були проведені дослідження з різними типами інгібіторів, щодо визначення ступеня захисту (%) сталей групи нуль від вмісту сірководню. Зразки випробовувалися протягом 2 год при температурі 80°C. Концентрація інгібітору становила близько 420 - 530 мг/л. Результати випробувань наведені в табл. 10.5.

Особливістю досліджень були аномально високі температури, вода хлоридно-натрієвого складу з мінералізацією від 2,1 до 37,3 г/л і присутністю аніонів CO_3 , SO_4 і HCO_3 . В таких умовах швидкість корозії збільшується, що призводить до швидкого виходу з ладу обладнання, обсадних колон, бурильних труб і породоруйнівного інструменту. Встановлено, що в таких умовах в якості інгібітору корозії найбільш доцільно застосовувати ІКБ-«В», захисна дія якого заснована на здатності адсорбуватися на поверхні металів з утворенням плівки, яка служить бар'єром між металом і навколишнім середовищем. ІКБ-«В» випускається у вигляді 50% водо- і нафторозчинних паст.

Важливе значення для вивчення корозійних властивостей ПР мають поляризаційні характеристики. Аналіз корозійних поляризаційних діаграм, побудо-

ваних на основі анодних і катодних поляризаційних кривих, дозволяє зробити якісне і кількісне судження про характер корозійного процесу.

Таблиця 10.5

Результати досліджень захисної дії інгібіторів

Промивальна рідина		Ступінь захисту (%) для сталей групи			
Основа	Добавка		Д	Е	К
	назва	вміст, г/л			
Технічна вода	АО - 1	490	48	46	22
	Коримид	590	100	100	100
	ІКБ - В	480	100	100	100
	ЦКБ - 2 - 2	420	69	62	64

Сутність поляризаційного методу зводиться до знаходження з поляризаційних даних залежності між швидкістю протікання на електроді відповідної реакції і його потенціалом. Якщо в ПР знаходиться інгібітор, то електрохімічні вимірювання дозволяють визначити вплив добавки на кінетику катодного і анодного процесів, а також встановити переважну дію інгібітору на один з них.

Поляризаційні дані дозволяють судити про викликання добавкою зміни струму саморозчинення, а звідси – про вплив концентрації добавки на швидкість процесу. Найбільш зручний метод вивчення кінетики електродних процесів – це отримання анодних поляризаційних кривих, тобто встановлення залежності між анодним струмом і потенціалом електрода.

В пропонованій до розгляду роботі анодні поляризаційні криві були отримані потенціостатичним методом, при якому підтримують на електроді постійні значення потенціалу і заміряють сталу щільність струму. Зняття поляризаційних кривих проводилося на потенціостаті П-56П. Установка складалася з електролітичного елементу, потенціостата, катодного вольтметра, швидкодіючого потенціометра БП-5684. Методом зняття поляризаційних кривих досліджували зразок вуглецевої сталі групи міцності Х, в воді і глинистому розчині, з різною концентрацією інгібітору ІКБ-«В». Використовуючи залежності щільності струму від швидкості корозії, були отримані значення швидкості корозії для ІКБ-«В» у воді (табл. 10.6).

Таблиця 10.6

Результати вимірювання захисної дії інгібітору ІКБ-«В» у воді

С, мг/л	Щільність струму, mA/cm^2	Показник стійкості, мм/рік
0	$4,37 \cdot 10^{-1}$	5,06
1	$4,56 \cdot 10^{-1}$	5,2
5	$5 \cdot 10^{-1}$	5,8
20	$5,25 \cdot 10^{-1}$	6
50	$4,36 \cdot 10^{-1}$	5

Встановлено, що досліджуваний інгібітор має захисні властивості при концентрації вище 20 мг/л і оптимальною є концентрації понад 50 мг/л. Результати визначення захисної дії ІКБ-«В», при введенні його в склад глинистого розчину, наведені в табл. 10.7.

Таблиця 10.7

Результати вимірювання захисної дії інгібітору ІКБ-«В» у глинистому розчині

C, мг/л	Щільність струму, мА/см ²	Показник стійкості, мм/рік
0	$1,5 \cdot 10^{-1}$	0,17
1	$1,38 \cdot 10^{-1}$	0,16
5	$1,1 \cdot 10^{-1}$	0,12
20	$0,725 \cdot 10^{-1}$	0,08
50	$2,76 \cdot 10^{-1}$	0,3

Концентрація інгібітора ІКБ-«В» 20 мг/л є оптимальною для даних умов протікання корозійного процесу вуглецевої сталі в буровому розчині (ПР). Подальше збільшення концентрації інгібітору призводить до зростання швидкості корозії [129]. Випробування проводилися в умовах, що найбільш повно моделюють реальні (наявність NaCl в кількості 30 г/л, додатково розчини нагрівалися до 70°C). Дія інгібітору на антикорозійні властивості ПР залежить від наявності в їх складі ПАР, розчинів електролітів і хімічних реагентів.

Введення інгібітору корозії ІКБ-«В» до складу глинистого розчину сприяє, окрім іншого, поліпшенню його технологічних властивостей (табл. 10.8).

До появи центрів корозії на внутрішній поверхні труб може призводити прискорений спуск доліт у свердловину. Надалі, ПР, діючи на обсадні труби, утворюють осередки корозії в інтервалі зняття окалини і ризок. Для попередження пошкодження ОТ рекомендується застосовувати спеціальні покриття ПРІ при спуску БС в свердловину.

Таблиця 10.8

Залежність властивостей промивальної рідини від концентрації інгібітору

№ з/п	Склад промивальної рідини		Властивості промивальної рідини		
			Водовіддача, см ³ за 30 хв	В'язкість, с	Питома вага, кг/м ³
1	Без інгібітору		5	25 - 30	1200
2	З інгібітором	1 мг/л	5	30	1200
		5 мг/л	4,9	33	1210
		20 мг/л	4,5	40	1220
		50 мг/л	4,2	55	1250

При виборі матеріалу труб для свердловини з мінеральними водами, необхідно враховувати тип води і стійкість до корозії матеріалу в ній. У вуглекислих водах, що містять іони хлоридів і сульфатів, найбільш стійкими є труби з нержавіючої сталі, поліетилену, вініпласту, а менш стійкі зі сталі і азбоцементу.

10.4 Екологічні питання буріння свердловин

Підкреслимо, що для нашої держави саме нафтова і газова промисловість виступають пріоритетним та перспективним напрямком розвитку економіки [131]. Стале функціонування нафтової і газової галузей має на меті забезпечення різних секторів промислового виробництва та побутових потреб енергоносіями та відповідною потребою замкнутих циклів хімічною сировиною.

Дамо декілька пояснень, які дозволять сформулювати ключові вимоги до процесів розробки родовищ нафти і газу. Загалом нафта представляє собою горючу корисну копалину, з хімічної точки зору це досить складна суміш вуглеводнів різних класів [48]. Фізично нафту можна охарактеризувати як в'язку рідину жовтувато-зеленого, червоно-коричневого упритул до чорного кольору, іноді зустрічається навіть безбарвна нафта; вона має характерний запах, як правило, її густина менше ніж густина води, в останній вона нерозчинна. З геологічних характеристик нафти, необхідно підкреслити те, що вона утворюється разом з газоподібними вуглеводнями на глибині понад 1000 м; може залягати на глибинах від десятків метрів до 5000 м і навіть дещо більше. Природний газ представляє собою суміш газів (метану – до 98%, етану, пропану, бутану тощо), що утворилася (доречи як і нафта), відповідно до основних (проте дискусійних) положень теорії органічного походження вуглеводнів, в надрах при анаеробному розкладанні органічних речовин та наступній конденсації у так званих пастках верхньої мантії (вони виступають частиною природного резервуара, в якій зберігаються та циркулюють вуглеводні). Природний газ не має кольору і запаху. Поклади природного газу, як і нафти, знаходиться на глибинах від 1000 м до декількох кілометрів, упритул до 6000 метрів і більше. Наведені факти дають чітку уяву про те, що за вказаних умов (найголовнішою з яких є достатньо великі глибини) пошук, розвідка і видобуток розглядуваного типу вуглеводнів можливі лише за використання свердловинних технологій [51].

Необхідними факторами існування покладів нафти і газу є такі наступні [54]: власне кажучи наявність самих вуглеводнів; наявність колекторських властивостей для гірських порід, що вміщують нафту і газ; наявність пасткових умов (іншими словами повинні існувати – флюїдовмісний об'єм, тобто породи-колектори та флюїдоупори, тобто породи-покришки, які екранують поклад вуглеводнів). Нафта та газ поступово накопичуються в пористих, кавернозних або тріщинуватих гірських породах-колекторах, що залягають серед слабопроникних порід-покришок [59]. Зазначимо тут, що переважно більша частина природного резервуару заповнена так званими седиментаційними водами; вуглеводні, у порівнянні з присутньою в пастці водою, є більш пізніми утвореннями. Вірну відповідь про наявність покладів вуглеводнів у пастці може дати тільки буріння і випробування свердловин відповідної конструкції; причому означене повинно супроводжуватися беззаперечним дотриманням норм екологічної безпеки та захисту навколишнього середовища [132].

Сучасний етап розвитку нафтогазової промисловості наполегливо вимагає відкриття та експлуатації нових потужних нафтових та газових родовищ (у то-

му числі нині не залучених до розробки через особливості походження та складність геологічних умов залягання), що може бути досягнуто виключно за деталізованого наукового підходу до вивчення надр [49].

Відповідно до вирішуваної проблематики, прийняті до аналізу літературні джерела інформації та дані промислових організацій [14], беззаперечно доводять, що умови проведення геолого-бурових робіт, скерованих на вирішення вельми актуальних проблем пошуку та розвідки перспективних та промислово-придатних родовищ вуглеводнів постійно змінюються, а методика їх досліджень достатньо швидко ускладнюється.

Наразі ми можемо констатувати, що геолого-пошукові та розвідувальні роботи на нафту і газ проводять на великих (понад 6000 м) глибинах; до вивчення та експлуатації залучаються родовища вуглеводнів розташовані не лише в типових осадових басейнах, а й у кристалічних докембрійських породах; згадані поклади знаходяться як на суші, так і, відповідно до загального визначення, у морських акваторіях [41].

Практика здійснення циклу операцій з промислової розробки родовищ вуглеводнів (і не тільки) доводить, що подальший сталий інноваційний розвиток нафтогазодобувної галузі промисловості неодмінно потребує проведення широкомасштабних теоретичних і прикладних науково-технічних досліджень (із залученням значних за обсягом фінансових джерел), результати яких стануть міцним підґрунтям проведення пошуково-розвідувальних робіт [44].

Тільки вичерпні знання з базових фундаментальних та прикладних дисциплін дають змогу геологам та технологам здійснювати обґрунтування складних за змістом і наповненням проектів розробки родовищ [46]. Швидко орієнтування в питаннях нафтогазопромислової геології та гідрогеології, техніки і технології буріння, екології а також наступної експлуатації нафтових і газових свердловин дозволяє інженерам-практикам створювати раціональні регламенти спорудження свердловин різного призначення та номенклатури із високими техніко-економічними показниками. Не останню роль тут також відіграють питання бурової механіки, проблематика монтажу (демонтажу) і експлуатації бурових установок, допоміжного обладнання та інструменту, устаткування для виконання ремонтних робіт в свердловині [47].

Нами показано [51], що забезпечення послідовного інноваційного розвитку нафтової і газової промисловості неодмінно потребує використання бурових свердловинних та інших суміжних робіт з метою здійснення циклів пошуку, детальної розвідки і ефективної розробки нафтових і газових покладів [54].

Техніка і технологія буріння нафтових і газових свердловин (а також на інші корисні копалини), для своєї повної відповідності вимогам значного ускладнення умов спорудження свердловин (збільшення об'ємів глибокого і надглибокого експлуатаційного буріння, необхідність спорудження похило спрямованих і горизонтальних свердловин), повинні постійно удосконалюватися [12]. Виробничий цикл отримання в земних надрах свердловини, як інженерної споруди, є складним та високовартісним, тому ще не стадії проектування регламенту її будівництва необхідно сформулювати конкретні керівні вимоги

до означеної специфічної гірської виробки, як до об'єкту тривалої, ефективної і безаварійної експлуатації, а при її спорудженні забезпечити повне виконання принципів і норм технологічної, виконавчої та екологічної безпеки [133].

Неодмінною обставиною досконалості проєктних рішень щодо створення раціонального регламенту спорудження нафтогазових (а також інших їх груп відносно класу копалин) свердловин є наявність у інженерного персоналу максимально вичерпних даних щодо: геологічних особливостей розроблюваного родовища; ознак конструкції свердловин з огляду на необхідність їх промивання, кріплення та цементування (можливо, в складних термобаричних та геологічних умовах прояву ускладнень), виконуваних за недопущення проникнення шкідливих компонентів в оточуюче середовище; основних свердловинних процесів, які протікають при бурінні, а також їх впливу на експлуатаційні характеристики нафтогазових пластів при розкритті та випробуванні [131].

На відміну від особливостей виконання робіт з розвідки та освоєння родовищ деяких інших видів корисних копалин [70], для покладів нафти і газу означені роботи знаходяться в прямій підпорядкованості обґрунтованості вибору доцільного методу буріння і застосовуваного бурового, а також видобувного устаткування. Тут свердловина виступає тим єдиним засобом сполучення із глибоко розташованими земними надрами, який забезпечує доступ до пластових флюїдів, що залягають, до того ж, в багатьох випадках, під великим тиском. Правильний вибір технології і технічних засобів для розробки конкретного родовища нафти і газу залежить від вірності аналізу численних природних та штучних факторів спорудження і експлуатації свердловин [52].

Резюмуючи викладене, можна стверджувати наступне [131]. Нагальними питаннями розвитку розглядуваної галузі є істотне підвищення ефективності спорудження глибоких і надглибоких свердловин різних груп призначення, що полягає в: суттєвому підвищенні геологічної інформативності бурових робіт; вдосконаленні структури техніко-технологічного забезпечення процесу буріння; кардинальному скороченні досить значних витрат на боротьбу зі свердловинними ускладненнями; забезпеченні проєктованої якості кріплення та розкриття продуктивних горизонтів в складних гірничо-геологічних умовах із дотриманням обмежувальних вимог екологічної безпеки [134].

Необхідно зазначити, що відповідно до норм діючого законодавства, а саме Закону України «Про оцінку впливу на довкілля» [131], оцінка впливу на довкілля необхідна при прийнятті рішення про так звану «планову діяльність», до якої належать: будівництво, реконструкція, технічне переоснащення, розширення, перепрофілювання, ліквідація (демонтаж) об'єктів, та інше втручання в природне середовище; в нашому випадку роботи відносяться до узагальненої категорії – спорудження та експлуатація свердловин [44].

В типовому випадку послідовність розробки родовища корисних копалин (для наших умов нафтогазового) складається, укрупнено, з таких комплексних виробничих циклів: геологорозвідувальні роботи; буріння свердловин (категорії розвідувальних та експлуатаційних); видобуток і промислова підготовка вугле-

воднів; транспортування та зберігання; переробка. Вплив, того або іншого походження, на довкілля буде відбуватися на усіх перелічених етапах.

Таким чином оцінка впливу на довкілля безпосередньо спрямована на формування і реалізацію заходів, метою яких є: запобігання виникненню негативного впливу на навколишнє природне середовище; забезпечення екологічної безпеки, охорони довкілля, раціонального використання і відтворення природних ресурсів у процесі прийняття управлінських рішень про провадження планованої діяльності, яка може мати значний вплив на довкілля, з урахуванням державних, громадських та приватних інтересів [135].

Під час реалізації етапу підготовчих робіт зі спорудження геологорозвідувальних та експлуатаційних свердловин виникає необхідність у раціональному виборі та відповідному плануванні земельних ділянок для влаштування бурових майданчиків. Вказані роботи, зокрема, полягають у зрізуванні родючого шару з поверхні будівельного майданчика і переміщенні його за межі ділянки проведення робіт для складування; при будівництві свердловин на родючих землях активного сільгоспкористування необхідно знімати та окремо зберігати родючий шар для подальшої рекультивації [136].

Видобування вуглеводнів повинно здійснюватися із суворим дотриманням усієї гама заходів з охорони навколишнього природного середовища, надр та попередження негативного впливу на довкілля. Ці заходи включають: запобігання негативного впливу на геологічне середовище; охорону повітряного середовища; запобігання забруднення горизонтів з прісними водами; зберігання родючого шару ґрунту від забруднення [133].

Необхідно зауважити, що надання земельних ділянок під спорудження свердловин у тимчасове користування здійснюється на весь період проведення бурових робіт, після чого вони мають бути повернуті користувачеві землі у стані, придатному для подальшого сільськогосподарського використання.

Процеси буріння свердловин, з екологічної точки зору, можна вважати впливом на геологічне середовище, який за розробки нафтогазових родовищ [137], виявляється у вигляді порушень нормативного стану геологічного розрізу свердловин при виконанні в них відповідних операцій технологічного циклу.

Уникнути негативного впливу на означене геологічне середовище можна за рахунок застосування раціональних конструкцій свердловин, які передбачають послідовне перекриття пробурених інтервалів згідно сумісного графіку тисків до проектних глибин обсадними колонами [51].

Вплив на геологічне середовище виявляється у вигляді порушень нормативного стану геологічного розрізу свердловин в процесі буріння. Запобігання негативного впливу на геологічне середовище необхідно здійснювати за рахунок застосування раціональних конструкцій свердловин, які включають послідовне перекриття пробурених інтервалів із сумісними умовами до проектних глибин обсадними колонами. Обсадні колони цементуються високоміцними тампонажними портландцементами до гирла кожної зі свердловин. Найбільш небезпечним для геологічного середовища можуть бути інтенсивні газопроявлення у випадку переходу їх у фонтанування при розкритті газонесних горизонтів.

Раціональні технічні рішення повинні включати наступне: вибір конструкції свердловини, яка забезпечує попередження гідророзриву розкритих гірських порід тиском газу при газопроявленнях і герметизацію устя противиکیدним обладнанням; підбір обсадних труб за міцністю, виходячи з очікуваного максимально можливого тиску на гирлі свердловини в процесі буріння і випробування на приплив газу і нафти; підбір густини бурового розчину, що забезпечує створення гідростатичного тиску в свердловині, перевищуючого пластовий; вибір типу бурового розчину і хімічних реагентів, що забезпечують створення на стінках свердловини тонкої, щільної і малопроникної кірки; герметизація гирла свердловини противиکیدним обладнанням; наявність на буровій певного об'єму запасного розчину необхідної густини в кількості, яка дорівнює об'єму стовбура свердловини при первинному розкритті продуктивних горизонтів. Із метою запобігання прояву активного затрубного руху пластових флюїдів із наступним засміченням водоносних горизонтів, а також міграції вуглеводнів в приповерхневі пласти, обсадні колони цементуються високоміцними тампонажними портландцементами до гирла свердловини [9].

Вибір типу промивальної рідини та хімічних реагентів для її обробки, які не допускають активний прояв порушення цілісності стовбура споруджуваної свердловини та попереджають виникнення фільтраційних явищ, повинен здійснюватися на підставі вивчення фізичних властивостей відповідних гірських порід та характеру їх поведінки в активному середовищі. Промивальні рідини містять у своєму складі активні хімічні компоненти, проникнення в ґрунт яких неприпустимо; тому з метою недопускання попадання фільтрату промивальних рідини, 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. Доставка застосовуваних при обробці промивальних рідин і тампонажних розчинів хімічних реагентів-регуляторів на буровий майданчик необхідно передбачати в герметичній тарі, яка унеможлиблює 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 обвалюваних та гідроізолюваних шламових амбарах. Приведені технічні рішення і заходи дозволяють оберігати геологічне середовище від негативного впливу процесів і явищ геологічного та техногенного походження [138].

При видобуванні вуглеводнів і експлуатації родовища основними джерелами впливу на атмосферне повітря є джерела викиду забруднюючих речовин, що розташовані на майданчику установки комплексної підготовки нафти і газу: димові труби вогневих підігрівачів, водяного титану, котлів, які працюють на природному газі; свічки сепараторів; дихальні клапани технологічних ємностей

зберігання нафти, конденсату, технологічних рідин; факельні установки експлуатаційних свердловин (при здійсненні технологічних операцій з попередження аварійних ситуацій). Особливістю експлуатації нафтогазових об'єктів є необхідність проведення вогнебезпечних робіт, необхідність обслуговування обладнання, яке в процесі експлуатації знаходиться під високим тиском, можливість утворення вибухонебезпечної суміші газу з повітрям при витіканні газу.

Умовою безпечної експлуатації обладнання з підготовки вуглеводневої сировини та самих свердловин є їх герметичність. Причиною порушення герметичності можуть бути: корозійний чи механічний знос обладнання, механічне руйнування обладнання, неналежне дотримання умов безпеки при вогневих роботах, несвоєчасна профілактика роботи запірної арматури та інше.

Для попередження виникнень аварійних ситуацій на розглянутих об'єктах, необхідно експлуатацію обладнання здійснювати в суворій відповідності з технологічним регламентом та нормами, запроваджувати необхідні методи контролю, проводити огляд обладнання та трубопроводів, дотримуватися графіка проведення планово-попереджувального ремонту [139].

Повітряне середовище при спорудженні кожної зі свердловин зазнає впливу продуктів згорання електродів при зварюванні під час монтажних робіт; продуктів згорання дизельного палива при роботі двигунів внутрішнього згорання бурового верстата, дизель-електростанції та допоміжних автомобілів (спецавтотранспорту); продуктів згорання природного газу на факелі при випробуванні свердловини; пилевикидів при приготуванні бурового розчину; продуктів випаровування з ємності для зберігання дизельного палива; продуктів вільного випаровування з поверхні гідроізолюваних шламових амбарів. З метою скорочення викидів забруднюючих речовин в повітряне середовище, рекомендується здійснювати такі заходи: забороняти роботу двигунів на форсованому режимі; підсилювати контроль за дотриманням регламенту виробничої діяльності; розподіляти в часі роботу обладнання, яке зв'язано з безперервним технологічним процесом; вказане дозволяє значно знизити викиди на буровій.

Для попередження забруднення повітряного басейну в процесі буріння свердловин необхідно: проводити профілактичний огляд герметизуючого гирлового обладнання, викидних ліній; проводити підбір обсадних труб за міцністю, а колонної головки, противикидного обладнання, фонтанної арматури, виходячи з максимального тиску газу на гирлі свердловини; з метою попередження неконтрольованого виходу газу на поверхню, густина бурового розчину вибирається з умови забезпечення створення протитиску на газонасичені пласти; для завчасного виявлення газопроявлення, необхідно постійно слідкувати за рівнем бурового розчину в приймальних ємностях; включати в компоновку бурової колони кульові крани; на випадок газопроявів мати на буровій запас бурового розчину необхідної густини не менше одного об'єму свердловини [140].

Аналіз виробничої діяльності бурових підприємств свідчить, що найуразливішим компонентом довкілля, який найбільше зазнає негативного впливу з боку реалізації технологічних процесів спорудження свердловин, є поверхневі

та підземні води – це є наслідком їхньої розповсюженості, динамічності, ресурсної цінності та виняткової важливості екосистемних функцій [134].

Для запобігання подібним явищам при здійсненні робіт необхідно максимально понизити можливість забруднення геологічного середовища продуктами паливно-мастильних матеріалів (ПММ), різними (наприклад, особливо шкідливими полімерними) добавками до промивальних рідин.

Після завершення робіт усі гірські виробки необхідно ліквідувати шляхом їх засипки піском і наступним затрамбуванням, щоб уникнути просідань поверхні землі, які, у свою чергу, можуть привести до розвитку різного роду екогенно-геологічних процесів (яроутворення, заболочування). Бурові свердловини повинні бути ліквідовані у встановленому порядку, шляхом заповнення їх стовбура спеціальними сумішами.

Основними заходами щодо очищення стічних вод є: замкнуте оборот-водопостачання підприємств; розбавлення до гігієнічно-прийнятних шкідливих речовин; застосування механічних, хімічних і біологічних методів очищення.

Виконуючи інженерно-геологічні дослідження, необхідно запобігати витокам у водоймища і водостоки забруднених промивальних рідин, нафтопродуктів, вод і розчинів, що містять токсичні речовини.

Організації, що займаються спорудженням свердловин зобов'язані дотримуватися наступних правил щодо нівелювання впливу викидів забруднюючих речовин в атмосферне середовище: здійснювати організаційно-господарські, технічні та інші заходи, спрямовані на забезпечення виконання вимог, передбачених стандартами та нормативами екологічної безпеки у галузі охорони атмосферного повітря, дозволами на викиди забруднюючих речовин тощо; вживати заходів щодо зменшення обсягів викидів забруднюючих речовин і зменшення впливу фізичних факторів; забезпечувати безперебійну ефективну роботу і підтримання у справному стані споруд, устаткування та апаратури для очищення викидів і зменшення рівнів впливу фізичних та біологічних факторів; здійснювати контроль за обсягом і складом забруднюючих речовин, що викидаються в атмосферне повітря, і рівнями фізичного впливу та вести їх постійний облік; заздалегідь розробляти спеціальні заходи щодо охорони атмосферного повітря на випадок виникнення надзвичайних ситуацій техногенного та природного характеру і вживати заходів для ліквідації причин, наслідків забруднення атмосферного повітря; забезпечувати здійснення інструментально-лабораторних вимірювань параметрів викидів забруднюючих речовин [136].

Роботи з ведення моніторингу підземних вод України здійснюються відповідно до Положення про державну систему моніторингу довкілля в частині моніторингу вод та Водного кодексу України. Основною метою моніторингу підземних вод – є спостереження за станом підземних вод, як одного з найважливіших компонентів оточуючого середовища, з підготовкою необхідної інформації та прогнозів різного призначення, а також розробки науково-обґрунтованих рекомендацій для прийняття рішень про запобігання негативним змінам режиму підземних вод та дотримання вимог екологічної безпеки.

Таким чином, перелічені екологічні заходи покликані забезпечити захист

грунту 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.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 10

1. Запропоновано для характеристики мастильної здатності промивальної рідини використовувати коефіцієнт тертя пари «сталь - гірська порода», що являє собою відношення тангенціального зусилля опору до нормального навантаження, на яке істотний вплив чинять різноманітні добавки, що адсорбуються на означених поверхнях розділу.

2. Зазначено, що максимальна ефективність поверхнево-активних речовин, як компонента бурового агента, визначається активністю їх полярних молекул.

3. Встановлено, що на мастильну здатність промивних рідин не чинять істотного впливу технологічні фактори, а вона більшою мірою залежить від типу мастильної добавки та її вмісту.

4. Відзначено, що введення до складу промивальної рідини поверхнево-активних речовин, забезпечує значне зменшення зносу бурового інструменту.

5. Запропоновано точне рішення диференціального рівняння для визначення розподілу тисків в гідростатичних підшипниках.

6. Показано, що при хімічній корозії процес руйнування починається з поверхні металу, а з розвитком він поширюється вглиб.

7. Встановлено, що ефективним способом захисту бурового інструменту від корозії є добавки до промивальних рідин спеціальних речовин – інгібіторів корозії, які, адсорбуючись на поверхнях розділу, утворюють захисні протикорозійні плівки.

8. Відзначено, що дія інгібіторів корозії залежить від хімічного складу останніх, кількісного вмісту їх в промивальній/технологічній рідині і аспектів режиму застосування останніх.

9. Вивчено основні проблеми і завдання при розробці раціональної екологічно обґрунтованої технології спорудження свердловин та їх безпечної експлуатації; кожній з складнобудованих операції технологічного циклу спорудження свердловин на нафту і газ та інших суміжних робіт, надано опис відповідного екологічного аспекту захисту оточуючого середовища.

10. Переконаливо доведено, що подальше удосконалення операцій виробничого циклу спорудження розвідувальних та експлуатаційних свердловин в обов'язковому порядку повинно супроводжуватися ґрунтовною розробкою відповідних заходів з недопущення порушення технологічної послідовності та екологічної рівноваги виконання робіт.

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

Монографія, що вами переглянута, є комплексною науково-дослідною роботою в області спорудження свердловин різного призначення, зокрема за питаннями: організації технології прямої та зворотної схем циркуляції очисного агенту; уточнення механізму процесів, які відбуваються на межах розділу «гірська порода - бурова промивальна рідина» і «породоруйнівний інструмент - бурова промивальна рідина»; виявлення функціонального зв'язку між діючими факторами і властивостями гірських порід і бурового інструменту; обґрунтування механізму впливу промивальних рідин на процес руйнування гірських порід, стійкості бурового інструменту та стійкості стінок свердловин; визначення впливу технологічних чинників на характер зазначених вище механізмів контактної взаємодії; розроблення наукових основ прогнозування якісних і кількісних показників процесів при бурінні свердловин з урахуванням впливу промивальних рідин; удосконалення гідромеханічних снарядів з позицій мінімізації енергоємності процесу руйнування та скорочення витрат на допоміжні операції; екологічної складової бурових свердловинних процесів. Наприкінці необхідно відзначити наступні важливі висновки за змістом роботи.

1. В роботі, на конкретних прикладах, показана гостра необхідність: теоретичного обґрунтування і експериментального підтвердження проблематики питань врахування термодинамічної і кінетичного аспектів прояву ефекту адсорбційного зниження міцності гірських порід; розроблення наукових підходів до конструювання бурових снарядів і породоруйнівних інструментів, які забезпечують підвищення ефективності процесів при бурінні свердловин.

2. В роботі, окрім іншого, запропонована науково обґрунтована методика вибору поверхнево-активних речовин для промивальних рідин, які вибірково хемосорбуються на гірській породі і буровому інструменті; визначено екологічні чинники та обмеження стосовно складу рецептур і технологічних аспектів буріння свердловин. Необхідно також зазначити наступне: наявність тісного зв'язку між усіма вказаними обставинами, які визначають ефективність руйнування порід, унеможливує подальше удосконалення процесів буріння без досить повного вивчення всіх явищ, що відбуваються на вибої свердловини.

3. В роботі, в логічній і технологічній послідовності, розглянуто виробничий цикл спорудження свердловин – у всій його масштабній кількості трудомістких, енергоємних, складних і фінансово витратних процесів, зокрема: руйнування гірської породи на вибої (у т.ч. фізичними способами); видалення зруйнованої породи (у вигляді керну та шламу) з-під торця породоруйнівного інструменту і транспортування її на поверхню; підтримки стінок свердловини в стійкому стані; спуску і підйому бурового інструменту та ін. На підставі конкретних прикладів показано, що ефективність зазначених процесів в значній мірі залежить від способу і режиму циркуляції та властивостей промивальних рідин, вибір яких визначається екологічними і технологічними вимогами до них, а також гірничо-геологічними умовами буріння конкретної свердловини.

4. Відмітною рисою роботи є ґрунтовний аналіз досвіду буріння свердловин різного призначення, на підставі якого продемонстровано таке: високі тех-

ніко-економічні показники окремих процесів і всього циклу, в цілому, можуть бути досягнуті тільки при створенні раціональної методики вибору промивальних рідин і досконалої технології їх застосування в поєднанні з сучасним обладнанням і інструментом. На підставі представлених матеріалів, можна стверджувати, що поверхнево-активні речовини можуть чинити істотний вплив на енергоємність процесу руйнування порід, стійкість інструменту, підтримання стінок свердловини, реологічні властивості дисперсних систем.

5. Детально вивчено основні технологічні методи та прийоми ведення процесу буріння із застосуванням комплексів із гідротранспортом керна. Ця обставина дозволила вивести уточнені формули визначення швидкості руху кернових проб, які відрізняються простотою та можливістю отримання швидкісних характеристик без застосування значних припущень. Сформульовано ґрунтовні рекомендації щодо проектування гідравлічної програми; їх дотримання дозволить з одного боку максимально ефективно проходити свердловини, а з іншого забезпечити досить високий рівень прив'язки зразків до конкретних інтервалів.

6. В роботі, на якісно новому рівні, досліджено необхідність встановлення фізичної сутності явищ, які відбуваються при відділенні елемента гірської породи від масиву в умовах зовнішнього тиску; зазначене дозволить визначати найбільш раціональні параметри руйнування гірської породи на вибої свердловини, тобто максимальну продуктивність при мінімальних витратах енергії.

Необхідно зазначити, що авторами роботи в якості пріоритетного напрямку розвитку технології спорудження і експлуатації свердловин, обрані методики визначення рецептур високоякісних промивальних рідин і проектування досконалої гідравлічної програми їх застосування в поєднанні з сучасним обладнанням і інструментом. Досліджені в монографії питання: впливу параметрів очисного агента на вибійні процеси руйнування порід; взаємозв'язку між фізико-геометричними характеристиками продуктів руйнування і циркуляційними процесами на вибої і в стовбурі свердловини; особливостей схеми циркуляції очисного агента, пов'язані з різноманітністю геолого-технічних факторів; фізико-хімічні і екологічні аспекти бурових свердловинних процесів – є повністю оригінальними роботами авторів. Основою проведення всіх дослідно-конструкторських робіт було вивчення значного числа джерел, в тій чи іншій мірі присвячених питанням вдосконалення циркуляційних процесів в свердловинах, що відображено в списку використаної літератури.

Новизна та інноваційний технічний рівень інженерних рішень, представлених в монографії, підтверджені патентами України. Розроблені технічні, а рівно і технологічні рішення можуть бути впроваджені на основних об'єктах ведення бурових робіт, як в Україні, так і за кордоном.

Сподіваємось на надзвичайну корисність монографії для наукових та інженерно-технічних працівників, які займаються справами спорудження свердловин, а також студентів відповідних технологічних спеціальностей; із вдячністю приймемо ваші рекомендації стосовно вдосконалення монографії.

Висловлюємо слова подяки всім науковцям НТУ «Дніпровська політехніка», які підтримували нас своїми корисними порадами, а також В.О. Расцветаєву, В.В. Яворській та І.К. Аскерову за підготовку рукопису до друку.

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-підймальні операції;
ПАР – поверхнево-активна речовина (речовини);
ОК – обсадна колона;
ОТ – обсадна труба (труби);
БУ – бурова установка;
ОВК – очікування виносу керну;
БІ – буровий інструмент (інструменти);
ГС – гідростатичний тиск;
ГМБ – гідромеханічне буріння;
ПАА – поліакриламід;
АВПТ – аномально високий пластовий тиск;
ГРС – газорідинна суміш;
ОБТ – обважені бурильні труби;
ВПР – в'язко-пластична рідина;
ОВП – окислювально-відновний потенціал.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Войтенко, В., & Вітрик, В. (2012). *Технологія і техніка буріння*. Центр Європи.
2. Коровяка, Є., Хоменко, В., Винников, Ю., Харченко, М., & Расцветаєв, В. (2021). *Буріння свердловин*. НТУ "ДП".
3. Vaddadi, N. (2015). *Introduction to oil well drilling*. Bathos publishing.
4. Вирвінський, П., Кузін, Ю., & Хоменко, В. (2010). *Геологорозвідувальна справа і техніка безпеки*. Національний гірничий університет.
5. Коцкулич, Я., & Кочкодан, Я. (1999). *Буріння нафтових та газових свердловин*. Вік.
6. Дудля, М. (2011). *Промивальні рідини в бурінні*. Державний ВНЗ "Національний гірничий університет".
7. Ігнатов, А., & Ставичний, Є. (2020). Лабораторні та промислові дослідження процесу цементування нафтогазових свердловин в умовах товщ осадових порід. *Інструментальне матеріалознавство*, (23), 88–103.
8. Ставичний, Є., & Ігнатов, А. (2019). Особливості кріплення стовбура свердловини у хемогенних відкладах. *Porodorazrushaiushchyi u metalloobrabatyvaiushchyi ynstrument–tekhnyka u tekhnolohyia eho yzghotovlenyia u pryumenenyia*, (22), 164–174.
9. 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>.
10. Павличенко, А., Ігнатов, А., Коровяка, Є., Барташевський, С., Коротка, І., & Мекшун, М. (2021). Основи організації системи гідравлічного очищення свердловин. *Збірник наукових праць НГУ*, (67), 136–152.
11. 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)

12. Hossain, M., & Islam, M. (2018). *Drilling engineering: problems and solutions*. Scrivener publishing.
13. Speight, J. G. (2018). *Formulas and Calculations for Drilling Operations*. Wiley & Sons, Limited, John.
14. Павличенко, А., Коровяка, Є., Ігнатов, А., & Давиденко, О. (2021). *Гідрогазодинамічні процеси при спорудженні та експлуатації свердловин*. НТУ "ДП".
15. 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>
16. Azar, J. J., & Samuel, G. R. (2007). *Drilling Engineering*. PennWell Corp.
17. 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>
18. Коцкулич, Я., & Тищенко, О. (2004). *Закінчування свердловин*. Інтерпрес ЛТД.
19. 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.
20. Modi, P., & Seth, S. (2004). *Fluid mechanics and hydraulic machines*. Standard Book House.
21. Falkovich, G. (2011). *Fluid Mechanics: A Short Course for Physicists*. Cambridge University Press.
22. Павличенко, А., Ігнатов, А., & Ставичний, Є. (2023). Особливості техніко-технологічного супроводження операцій кріплення та цементування свердловин. *Інструментальне матеріалознавство*, (26), 80–92.

23. Ігнатов, А. О., & Ставичний, Є. (2022). Деякі питання технологій промивання та кріплення свердловин у складних умовах. *Інструментальне матеріалознавство*, (25), 119–132.
24. 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.
25. Ставичний, Є. М., Фем'як, Я. М., Тершак, Б. А., Ігнатов, 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)
26. Чудик, І., Дудич, І., & Токарук, В. (2020). Моделювання процесу промивання свердловин. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*, 2(75), 62–68.
27. 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>
28. 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.
29. Saenn, R., Gray, G., & Darley, H. (2020). *Composition and Properties of Drilling and Completion Fluids*. Publisher: Gulf Professional Publishing.
30. 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>
31. Skalle, P. (2015). *Drilling fluid engineering*. Publisher: bookboon.com isbn 978-87-403-1139-6.
32. Dalal, M. (2018). *Physical Chemistry*. Publisher: Dalal Institute.

33. Tahir, M. B., Sagir, M., Mushtaq, M., Tahir, M. S., & Shaik, A. R. (2020). *Surfactants for Enhanced Oil Recovery Applications*. Springer.
34. Ігнатов, А. О. (2020). До питання визначення вибійних робочих характеристик пристроїв гідромеханічного буріння. *Інструментальне матеріалознавство*, (23), 78–88.
35. 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>
36. Bansal, R.K. (2010). *Hydraulics and fluid mechanics*. Laxmi Publications LTD.
37. Kumar, D.S. (2009). *Fluid mechanics and fluid power engineering*. Publisher: S K Kataria and Sons.
38. Milap, G. (2017). *Mud Engineering Simplified*. Publisher: BecomeShakespeare.com.
39. Пащенко, О., Ігнатов, А., & Владико, О. (2021). Деякі особливості руйнування гірського масиву на вибої свердловини. *Інструментальне матеріалознавство*, (24), 121–134.
40. Ігнатов, А., Пащенко, 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.
41. 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>
42. 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)
43. Davydenko, O., & Ihnatov, A. (2020). Research into influence of filtrate mud liquids on rocks swelling processes. *Tooling materials science*, (23), 36–49.

44. Austin, E.H. (2012). *Drilling Engineering*. Publisher: Springer Science & Business Media.
45. Коровяка, Є., & Ігнатов, А. (2020). Особливості гідротранспорту знімних керноприймачів. *Tooling materials science*, (23), 103–114.
46. Коровяка, Є., & Ігнатов, А. (2020). *Прогресивні технології спорудження свердловин*. НТУ «ДП».
47. Ouadfeul, S.-A., & Aliouane, L. (Ред.). (2020). *Oil and Gas Wells*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.78185>
48. Speight, J. G. (2013). *Heavy Oil Production Processes*. Elsevier Science & Technology Books.
49. Looyeh, R., & Aadnoy, B. (2011). *Petroleum Rock Mechanics: Drilling Operations and Well Design*. Elsevier Science & Technology Books.
50. Davidenko, A., & Ighnatov, A. (2016). Basic results of researches of lining and plugging processes at wells construction. *Metallurgical and Mining Industry*, 9, 58–64.
51. Aziukovskyi, O., Koroviaka, Y., & Ihnatov, A. (2023). *Drilling and operation of oil and gas wells in difficult conditions*. Zhurfond.
52. Jeffery, W.H. (2015). *Deep Well Drilling: The Principles and Practices of Deep Well Drilling*. Publisher: Palala Press.
53. Ping, W.L. (2016). *Foam drilling cycle theory and practice*. Publisher: Petroleum Industry Press.
54. Terry, R.E., Rogers, J.B., & Craft, B.C. (2014). *Applied Petroleum Reservoir Engineering*. Publisher: Prentice Hall.
55. Lopez, J.C., Lopez, J. E., & Javier, F. (2017). *Drilling and blasting of rocks*. CRC Press Taylor & Francis.
56. Zhang, Z.-X. (2016). *Rock Fracture and Blasting: Theory and Applications*. Elsevier Science & Technology Books.
57. Папушин, Ю., Смирнов, В., & Білецький, В. (2006). *Дослідження корисних копалин на збагачуваність*. Східний видавничий дім.
58. Guhey, R. (2017). *Geology*. Publisher: Imprint NIPA.

59. Mukerji, T., Dvorkin, J., & Mavko, G. (2019). *Rock Physics Handbook*. Cambridge University Press.
60. Ihnatov, A. (2021). Analyzing mechanics of rock breaking under conditions of hydromechanical drilling. *Mining of Mineral Deposits*, 15(3), 122–129. <https://doi.org/10.33271/mining15.03.122>
61. Вакарчук, С. О., Демків, Т. М., & Мягкота, С. В. (2010). *Фізика*. ЛНУ ім. І. Франка.
62. Коровяка, Є., Ігнатов, А., & Расцветаєв, В. (2021). Особливості бурових робіт при інженерних вишукуваннях і підготовці територій. *Інструментальне матеріалознавство*, (24), 102–113.
63. Суярко, В., Сердюкова, О., & Сухов, В. (2013). *Загальна та нафтогазова геологія*. ХНУ імені В.Н. Каразіна.
64. 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*.
65. Halidar, S. K. (2013). *Introduction to Mineralogy and Petrology*. Elsevier.
66. Islam, M. R., & Hossain, M. E. (2020). *Drilling Engineering*. Elsevier Science & Technology Books.
67. Natami, M. J. (2017). *Oilfield Survival Guide, Volume One: For All Oilfield Situations*. Oilfield Books, LLC.
68. Ляхов, Ю., Павлунь, М., & Ціхонь, С. (2011). *Геологія корисних копалин*. ЛНУ імені Івана Франка.
69. Смирнов В.І, В. (1995). *Геологія корисних копалин*. Вища школа.
70. Гурський, Д., Єсипчук, К., & Калінін, В. (2006). *Металічні корисні копалини України*. Центр Європи.
71. Sheng, J. (2010). *Modern chemical enhanced oil recovery: Theory and practice*. Gulf Professional Pub.
72. Sonnenberg, S. A., & Selley, R. C. (2014). *Elements of Petroleum Geology*. Elsevier Science & Technology Books.
73. Andal, M., & Rao, T. (2018). *Strength of Materials*. Cambridge University Press.

74. Ігнатов, А. О. (2021). Встановлення базових принципів функціонування окремих вузлів пристроїв гідро(пневмо)механічного буріння. *Інструментальне матеріалознавство*, (24), 76–87.
75. Ihnatov, A. O., & Askerov, I. K. (2021). The problematic issues concerning modern well drilling technologies. У *Молодь: наука та інновації* (с. 541–542).
76. Давиденко, О. М., & Ігнатов, А. О. (2019). Механіка ефективного руйнування гірських порід шарошково-ланцюговими долотами. *Інструментальне матеріалознавство*, (22), 148–157.
77. Fink, J. (2003). *Oil Field Chemicals*. Gulf Professional Publishing.
78. Sharma, K.K. & Sharma, L.K. (2016). *Physical Chemistry*. Publisher: Vikas Publishing.
79. Bansal, R. K. (2005). *A Textbook of Strength of Materials*. Laxmi Publications.
80. Carmichael, R. S. (2017). *Practical Handbook of Physical Properties of Rocks and Minerals (1988)*. Taylor & Francis Group.
81. Schreiber, E., & Liebermann, R. C. (1994). *Experimental Techniques in Mineral and Rock Physics: The Schreiber Volume*. Birkhauser.
82. Donaldson, E. C., & Tiab, D. (2015). *Petrophysics: Theory and Practice of Measuring Reservoir Rock and Fluid Transport Properties*. Elsevier Science & Technology Books.
83. Guéguen, Y. (1994). *Introduction to the physics of rocks*. Princeton University Press.
84. Ігнатов, А. О. (2023). Визначення змісту окремих складових технологічного процесу гідромеханічного буріння свердловин. *Інструментальне матеріалознавство*, (26), 39–49.
85. Stacey, F. D. (2008). *Physics of the earth* (4-те вид.). Cambridge University Press.
86. Ігнатов, А. О. (2015). *Пристрій для буріння* (Патент України № 109273). Український інститут інтелектуальної власності.
87. Ігнатов, А. О. (2016). *Пристрій для дробового буріння* (Патент України № 111350). Український інститут інтелектуальної власності.

88. Ігнатов, А. (2022). Дослідження технологічних особливостей реалізації гідромеханічного способу буріння. *Інструментальне матеріалознавство*, (25), 53–65.
89. Ігнатов, А. О., & Вяткін, С. С. (2013). *Кулеструмний пристрій для буріння свердловин* (Патент України № 102707). Український інститут інтелектуальної власності.
90. Ігнатов, А. О., & Вяткін, С. С. (2013). *Кулеструмний пристрій для буріння свердловин* (Патент України № 102708). Український інститут інтелектуальної власності.
91. Ludema, K. C. (1996). *Friction, wear, lubrication: A textbook in tribology*. CRC Press.
92. Ludema, K. C., & Ajayi, O. O. (2018). *Friction, Wear, Lubrication*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780429444715>
93. Hutchings, I., & Shipway, P. (2017). *Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials*. Elsevier Science & Technology Books.
94. Вамболь, С., Міщенко, І., & Кондратенко, О. (2016). *Технічна механіка рідини і газу*. НУЦЗУ.
95. Слободянюк, О. В. (2016). *Механіка*. Видавничо-поліграфічний центр "Київський університет".
96. Павловський, М. (2002). *Теоретична механіка: Статика абсолютно твердого тіла. Кінематика. Динаміка, Основи аналітичної механіки*. Техніка.
97. Кузьо, І. В., Шпачук, В. П., & Ванькович, Н. М. (2017). *Теоретична механіка*. Фоліо.
98. Мислюк, М., Рибчич, І., & Яремійчук, Р. (2002). *Буріння свердловин: Довідник: у 5 т. Т. 1: Загальні відомості. Бурові установки. Обладнання та інструмент*. Інтерпрес ЛТД.
99. Bhavikatti, S. (2002). *Strength of Materials*. Vikas Publishing House Pvt Limited.
100. Рудько, Г., Адаменко, О., Чепіжко, О., & Крочак, М. (2010). *Геологія з основами геоморфології*. Букрек.

101. Кучерук, І. М., & Горбачук, І. Т. (2006). *Загальний курс фізики*. Техніка.
102. Naghi, A. K. (2020). *Physical Chemistry and Its Interdisciplinary Applications*. Nova Science Publishers, Incorporated.
103. Венгер, Є., & Бушок, Г. (2003). *Курс фізики*. Вища школа.
104. Лебідь, В. (2005). *Фізична хімія*. Фоліо.
105. Atkins. (2010). *Physical Chemistry (Sale Fcc)*. Freeman & Company, W. H.
106. Ластухін, Ю., & Воронов, С. (2009). *Органічна хімія*. Центр Європи.
107. Яцимирський, В. (2007). *Фізична хімія*. Ірпінь: ВТФ «Перун».
108. Мислюк, М., Рибчич, І., & Яремійчук, Р. (2004). *Буріння свердловин: Довідник: у 5 т. Т. 3: Вертикальне та скероване буріння*. Інтерпрес ЛТД.
109. Костржицький, А., Калінков, О., Тіщенко, В., & Берегова, О. (2008). *Фізична та колоїдна хімія*. Центр учбової літератури.
110. Гомонай В. (2007) *Фізична та колоїдна хімія*. Нова книга.
111. Волошинець, В. А. (2017). *Фізична та колоїдна хімія*. Львівська політехніка.
112. Ковальчук, Є. П., & Решетняк, О. В. (2007). *Фізична хімія*. Видавничий центр ЛНУ імені Івана Франка.
113. В. Л. Чумак, В. Л., & Іванов, С. В. (2007). *Фізична хімія*. НАУ.
114. Павлов, Г. Г. (2014). *Петрографія*. Київський ун-т.
115. Яворський, В. (2016). *Основи теоретичної хімії*. Львівська політехніка.
116. Дмитрів, Г. С., & Павлюк, В. В. (2008). *Загальна та неорганічна хімія*. Видавничий центр ЛНУ ім. Івана Франка.
117. Запольский, А., Мішкова-Клименко, Н., & Астрелін, І. (2000). *Фізико-хімічні основи технології очищення стічних вод*. Лібра.
118. Кондрачук, М., Хабутель, В., Пашечко, М., & Корбут, Є. (2009). *Трибологія*. НАУ-друк.
119. Yasmin, A., & Yasin, M. (2017). *Advanced Practical Physical Chemistry*. Noor Publisher.
120. Bahl, B., Tuli, G., & Bahl, A. (2000). *Essentials of Physical Chemistry*. S Chand & Co.

121. Ahmed, T. (2010). *Reservoir Engineering Handbook*. Elsevier Science & Technology Books.
122. Пелевін, Л. Є., Міщук, Д. О., & Рашківський, В. П. (2015). *Гідравліка, гідромашини та гідропневмоавтоматика*. КНУБА.
123. Бугрій, О., Процах, Н., & Бугрій, Н. (2011). *Основи диференціальних рівнянь: теорія, приклади та задачі*. І. Чижиков.
124. Ihnatov, A., & Askerov, I. (2022). Study the possibilities of application impact pulses in construction of wells. *Collection of Research Papers of the National Mining University*, 69, 206–207. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/69.206>
125. Кондрачук, М. В., Хабутель, В. Ф., Пашечко, М. І., & Корбут, Є. В. (2009). *Трибологія*. НАУ-друк.
126. Гащук, П. М. (2002). *Лінійні динамічні системи і звичайні диференціальні рівняння*. Українські технології.
127. Смирнов, В. О., & Білецький, В. С. (2012). *Підготовчі процеси збагачення корисних копалин*. Східний видавничий дім, Донецьке відділення НТШ.
128. Rosen, M. J., & Kunjappu, J. T. (2012). *Surfactants and Interfacial Phenomena*. John Wiley & Sons, Inc. <https://doi.org/10.1002/9781118228920>
129. Давиденко, О. М., Ігнатов, А. О., & Науменко, М. О. (2018). Вивчення стану обсадної колони при цементуванні свердловин. *Інструментальне матеріалознавство*, (21), 113–119.
130. Копілевич, В., Карнаухов, О., Мельничук, Д., Слободяник, М., Скляр, С., & Чеботько, К. (2003). *Загальна та неорганічна хімія*. Фенікс.
131. Павличенко, А., Ігнатов, А., Коровяка, Є. А., & Аскеров, І. К. (2023). Основні техніко-технологічні та екологічні аспекти спорудження експлуатаційних свердловин. *Інструментальне матеріалознавство*, (26), 68–79.
132. 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>

133. 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.
134. 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>
135. 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>
136. Мислюк, М., Рибчич, І., & Яремійчук, Р. (2004). Буріння свердловин. *Довідник: у 5 т. Т. 5: Ускладнення. Аварії. Екологія*. Інтерпрес ЛТД.
137. Адаменко, О., & Рудько, Г. (1997). *Екологічна геологія*. Манускрипт.
138. Гошовський, С., Рудько, Г., & Преснер, Б. (2002). *Екологічна безпека техногенних геосистем у зв'язку з катастрофічним розвитком геологічних процесів*. ЗАТ “НІЧЛАВА”.
139. Robertson, J. O., & Chilingar, G. V. (2017). *Environmental Aspects of Oil and Gas Production*. John Wiley & Sons, Inc. <https://doi.org/10.1002/9781119117421>.
140. 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

**ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРАВЛІЧНИХ ОСНОВ ЦИРКУЛЯЦІЇ
ТЕХНОЛОГІЧНИХ РІДИН**
Монографія

Художнє оформлення та комп'ютерна верстка – Сюмер О.С.
Оформлення згідно зі стандартами книговидання – Данилевич Т.О.

Підписано до друку 06.05.2023. Формат 60x84/16. Папір офсетний.
Ум. друк. арк 10,6. Обл.-вид. арк. 10,8. Тираж 300 пр. Зам. №1502

Видавництво “Журфонд”
49000, Дніпро, пр. Д. Яворницького, 60.
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру
ДК №684 від 21.11.2001 р.

Віддруковано
Віддруковано:
ПП Вахмістров О. Є.,
м. Дніпро, вул. Писаржевського, буд. 18

Павличенко А.В.

П12 Дослідження гідравлічних основ циркуляції технологічних рідин: монографія / А.В. Павличенко, Є.А. Коровяка, А.О. Ігнатов; М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». – Дніпро: Журфонд, 2023. – 212 с.

ISBN 978-966-934-535-6

В роботі розглянуто наступні змістові модулі: стан та перспективи розвитку технології буріння свердловин із застосуванням різних схем циркуляції очисного агента та рецептур останніх; комплексні критерії, що визначають раціональну витрату очисного агента; сутність поверхневих та об'ємних фізико-хімічних явищ при протіканні циркуляційних процесів у свердловинах; фактори впливу промивальних рідин на фізико-механічні властивості гірських порід та процеси вибійного руйнування в цілому; взаємозв'язок між фізико-геометричними характеристиками продуктів руйнування та циркуляційними процесами на вибої та у стовбурі свердловини.

УДК 622.244.4

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, 15 патентів на винаходи та корисні моделі, понад 200 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, 30 патентів на винаходи та корисні моделі, понад 240 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, 40 патентів на винаходи та корисні моделі, понад 190 наукових праць.

