

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ « ПОЛТАВСЬКА
ПОЛІТЕХНІКА ІМЕНІ ЮРІЯ КОНДРАТЮКА»

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

на тему:

«Ультразвук для підвищення видобутку нафти на
Бугруватівському родовищі»

Група 601-МВ

Скрипник Вячеслав Володимирович
2025р.

Міністерство освіти і науки України
Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія
Кондратюка»

Навчально-науковий інститут нафти і газу
Кафедра нафтогазової інженерії та технологій
Спеціальність 185 Нафтогазова інженерія та технології

До захисту
завідувач кафедри

В.о. завідувач кафедри
С. Савчук

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

на тему Удосконалення для підвищення виробничої нафти та
бутирвасилівасилової поробилури

Пояснювальна записка

Керівник
доц.к.т.н. Рубель В.П.
посада, наук. ступінь, ПІБ

Виконавець роботи
Сиринський В.В.
студент, ПІБ
група 601-МВ

Консультант за 1 розділом
доц.к.т.н. Митрофанова О.В.
посада, наук. ступінь, ПІБ, підпис

Консультант за 2 розділом
доц.к.т.н. Рубель В.П.
посада, наук. ступінь, ПІБ, підпис

Консультант за 3 розділом
доц.к.т.н. Смирнов М.В.
посада, наук. ступінь, ПІБ, підпис

Консультант за 4 розділом
доц.к.т.н. Сиринський В.В.
посада, наук. ступінь, ПІБ, підпис

Дата захисту _____

Полтава, 2025

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка
(повне найменування вищого навчального закладу)

Навчально-науковий інститут нафти і газу
Кафедра нафтогазової інженерії та технологій
Освітньо-кваліфікаційний рівень: Магістр
Спеціальність 185 Нафтогазова інженерія та технології
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
В.О. Дук
С.Т. Гай
" 2 " 20 року

ЗАВДАННЯ
НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Сергій Сергійович Володимирович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) Умови збору для підвищеної продукції на бурі внаслідок родовищ

Керівник проекту (роботи) Рубель Р.П. доц.и.м.н.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навч. закладу від " 3 " 08 2024 року № 318/П

2. Строк подання студентом проекту (роботи) 28 грудня 2024 року

3. Вихідні дані до проекту (роботи) 1. Науково-технічна література, періодичні видання, патенти на винаходи, конспекти лекцій. 2. Проекти розробки чи технологічні схеми розробки родовищ (за необхідності). 3. Геологічні звіти та звіти фінансової діяльності підприємств за профілем роботи. 4. Технологічні режими роботи свердловин та експлуатаційні карточки свердловин.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

Вступ / Інформаційно-оглядова частина.

2. Експериментальна частина.

3. Теоретична частина (Аналітика. Моделювання).

4. Впровадження результатів досліджень. Висновки по проекту.

5. Перелік графічного матеріалу

ЗМІСТ

ВСТУП

АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ВІДЧИЗНЯНИХ І ЗАРУБІЖНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ВПЛИВУ НА НАФТОВІ ТА ГАЗОВІ ПЛАСТИ

1.1. Передумови застосування інноваційних технологій збільшення нафтогазовіддачі пласта за умов падаючого видобутку..

1.2. Роль існуючих методів інтенсифікації притоку нафти та газу в нафтогазовидобутку

Висновки за розділом 1

2.

ЕОРЕТИЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ТА ГЕОЛОГОТЕХНОЛОГІЧНІ ПЕРЕДУМОВИ СУХОВИХ ХВИЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ВПЛИВУ НА ПЛАСТ

2.1. Основні характеристики хвильових полів, що збуджуються

2.2. Особливості хвильових процесів у шаруватих неоднорідних середовищах

2.3. Технологія об'ємного хвильового впливу на продуктивні пласти

Висновки за розділом 2

3.

СОБЛИВОСТІ ТЕХНОЛОГІЇ ОБ'ЄМНОГО ХВИЛЬОВОГО ВПЛИВИ НА ПРОДУКТИВНІ ПЛАСТИ

3.1. Хвильові ефекти в обсязі нафтових пластів

3.2. Хвильові ефекти в обсязі газових пластів

3.3. Інтерференційні системи хвильового впливу на продуктивні пласти

Висновки за розділом 3

4.

ЕОРЕТИЧНЕ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ОБГРУНТУВАННЯ, ДОСВІД ПРАКТИЧНОГО ЗАСТОСУВАННЯ ТА РОЗРОБКА КОМПЛЕКСНИХ БАГАТОФАКТОРНИХ ХВИЛЬОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

4.1. Досвід застосування технології об'ємного хвильового впливу на газоконденсатні пласти

4.2. Хвильовий супровід гідророзриву пласта

4.2.1. Результати промислового застосування технологій хвильового супроводу ГРП

4.3. Комплексна технологія оптимізації газліфту

4.4. Застосування технології об'ємного хвильового впливу при закінченні свердловин

4.5. Особливості технології хвильового впливу на нетрадиційні джерела вуглеводнів та сланцеві резервуари

4.6. Висновки до розділу 4

ОСНОВНІ ВИСНОВКИ

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

Актуальність роботи. Визначається широким колом завдань в умовах, характерних для світової практики нафтогазовидобування сьогодні, – переходу більшості родовищ у заключну стадію розробки.

З метою забезпечення стабілізації видобутку вуглеводнів (ВВ) на перше місце виходить завдання видобування вуглеводнів із застійних, тупикових, законсервованих зон, а також величезний інтерес представляє видобуток нафти та газу з нетрадиційних джерел – метанокутних та сланцевих резервуарів.

У зв'язку з цим у цій роботі було поставлено питання розробки інноваційних комплексних багатofакторних хвильових технологій, які б поряд з впливом на вибійну зону свердловини (ПЗС) здійснювали інтенсифікацію припливу у віддалених зонах пласта, що містять блоковані зони, області зацемлених запасів, як для нафтових та газу, так і для метанокутних та сланцевих родовищ. Таке завдання не могло бути вирішено шляхом адаптації вже відомих технологій та зажадало принципово нових підходів. Вони були реалізовані в магістерській роботі шляхом розробки технологій об'ємного хвильового впливу (ОХВ) на виснажені, обводнені, неоднорідні та тонкошаркові колектори.

Крім того, застосування розроблених у магістерській роботі хвильових технологій інтенсифікації продуктивних пластів, ревізія та вторинне залучення у розробку законсервованих родовищ, а також «пропущених» пластів через недосконалість існуючих методів усунення впливу маскуючих пласт кольматантів є одними з можливих шляхів підвищення ефективності робіт і їхня витратність.

Мета роботи - збільшення вуглеводневіддачі пластів родовищ нафти і газу в умовах падаючого видобутку шляхом розробки комплексних багатofакторних хвильових технологій об'ємного впливу на продуктивні об'єкти.

Основні завдання роботи:

- аналіз сучасних вітчизняних та зарубіжних методів та технологій збільшення вуглеводнів віддачі продуктивних пластів родовищ нафти та газу;

- теоретичне обґрунтування та аналіз хвильових явищ у значних обсягах геосередовища, що включає продуктивний пласт в цілому, разом з аналізом хвильових процесів, що відбуваються в його привибійній зоні;

- науково-технічне обґрунтування технології фокусованого низькочастотного об'ємного хвильового впливу на продуктивні пласти;

- теоретичне та експериментальне обґрунтування, розробка комплексних багатофакторних хвильових технологій інтенсифікації процесів видобутку нафти та газу, що включають технології об'ємного хвильового впливу та традиційні технології гідророзриву пласта (ГРП), застосування ОХВ при освоєнні та кріпленні свердловин, при газліфтній експлуатації нафтових об'єктів;

- розробка науково обґрунтованих принципів організації системи ОХВ на газоконденсатні пласти, а також стосовно метанокислих та сланцевих родовищ.

Об'єкт дослідження - багатофакторні хвильові технології інтенсифікації процесів видобутку нафти і газу

Предмет дослідження- малодобітні обводнені свердловини

Методи вирішення поставлених завдань

В основу теоретичних досліджень були покладені методи теорії поля, теорії пружності та теорії випадкових функцій, зокрема кореляційної та спектральної теорії, теорії ймовірностей, методи прикладної теорії пружних хвиль та коливань, теорії фільтрації у пористих середовищах.

Моделювання та розрахунки хвильових явищ у геодинамічних системах, а також аналіз взаємодії останніх із хвильовими полями в обсязі продуктивних пластів проведено з використанням методів цифрової та комп'ютерної техніки у стандартних математичних системах.

Наукова новизна:

1. Дано наукове обґрунтування та розроблено принципи фокусованого низькочастотного об'ємного хвильового впливу на продуктивні пласти;

2. Проаналізовано комплексні багатофакторні хвильові технології інтенсифікації процесів видобутку нафти та газу, що включають технології об'ємного хвильового впливу та традиційні технології ГРП, застосування ОХВ

при освоєнні та кріпленні свердловин, при газліфтній експлуатації нафтових об'єктів;

3. Дано науково-технічне обґрунтування технології ОХВ при газліфтній експлуатації нафтових об'єктів.

4. Обґрунтовані принципи організації системи об'ємного хвильового впливу на газоконденсатні пласти, а також стосовно метанокутних та глинисто-сланцевих родовищ.

1. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ВІДЧИЗНЯНИХ І ЗАРУБІЖНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ВПЛИВУ НА НАФТОВІ І ГАЗОВІ ПЛАСТИ

1.1. Передумови застосування інноваційних технологій збільшення нафтогазовіддачі пласта за умов падаючого видобутку

Загально світовою тенденцією нафтогазовидобувної галузі є природний процес виснаження запасів вуглеводневої сировини, що призводить до необхідності інтенсифікації притоків нафти і газу при розробці продуктивних пластів з метою стабілізації або хоча б зниження темпів падіння видобутку.

Зниження основних показників розробки родовищ нафти та газу зумовлюється такими факторами:

- погіршенням фільтраційно-ємнісних властивостей (ФЕС) продуктивних пластів, особливо привибійної зони пласта (ПЗП) у процесі розробки;

- обводненням дуже значного числа свердловин, що призводить до зниження фазової проникності для нафти і газу та до зупинки або ліквідації свердловин. Внаслідок цього потенційні запаси, не залучені до розробки, досягають 60%;

- утворенням у межах покладу блокованих зон пласта;

- нерівномірним виробленням запасів із газо- та нафтонасичених зон пласта в часі;

- корозійною активністю середовища, виносом піску, відкладенням солей, парафінів та гідратів [64].

В даний час близько 62% запасів нафти і газу відносяться до складної групи вуглеводнів, розташованих у контактних зонах, у важкодоступних гірничо-геологічних умовах: важкі високов'язкі нафти, бітуми, вуглеводні у глинистих колекторах, щільних пісковиках, сланцях. Такі колектори характеризуються низькою проникністю, наявністю підгазових зон, обводненістю, значними затисненими залишковими запасами, великою глибиною залягання, високою в'язкістю нафти, початковими пластовими тисками, близькими до тиску насичення пластової нафти газами тощо. [64].

Передумовами до «неосвоєності» запасів є неякісні закінчення свердловин, освоєння, первинне та вторинне розкриття пластів, нераціональний вибір способу експлуатації, неувага до компонентного складу та умов залягання вуглеводнів кожного конкретного родовища, особливо на стадії падаючого видобутку, що призводить до передчасно .

Таким чином, принципово важливе значення набувають завдання оптимізації нафтогазовіддачі старих родовищ, прилучення і введення в експлуатацію важковивантажуваних запасів, затиснутих в тупикових, блокованих зонах пласта.

Для залучення у розробку залишкових запасів з погано проникних пластів за умов падіння видобутку нині застосовуються такі геолого-технічні заходи (ГТЗ):

- зарізка горизонтальних стволів у низькодебітних та зупинених вертикальних свердловинах;
- ізоляція водоприток у свердловинах;
- радіальне розтин пласта;
- декольматація ПЗП пінними системами за технологією «РЕТтекс»;
- заходи щодо інтенсифікації припливу нафти та газу:
- гідророзрив пласта в низькопродуктивних свердловинах;
- залучення перфорацією додаткових газо- та нафтонасичених інтервалів продуктивного розрізу;
- інтенсифікація припливу вуглеводнів з використанням хімічних, гідродинамічних (імпульсно-хвильових, пульсаційних, ударнохвильових та ін) методів впливу за допомогою колтубінгової установки в низькопродуктивних свердловинах;
- кислотні обробки привибійної зони пласта [35, 84].

Основним недоліком цих технологічних рішень є локальний характер їхньої дії, обмежений привибійною або ближньою зоною пласта.

Загальновизнаною причиною падіння видобутку нафти і газу є

виснаження пружної енергії пласта, відновлення якої має застосовуватися технологія на пласт загалом. Прикладом є широко поширені технології заводнення і водогазового впливу, але вони не вирішують проблеми вилучення вуглеводнів з блокованих зон пласта [32, 45].

У той же час, у процесі досліджень, виконаних у середині ХХ століття, було відзначено тісну кореляцію між землетрусами та рівнемвидобутку нафти, води, а також вміст радону в підземних водах нафтогазових регіонів, що доводить очевидний зв'язок між викидами пружної сейсмічної енергії при землетрусах і режимами роботи пластів

[44] Підвищення сейсмічної активності регіонів під час землетрусу та подальшого рою афтершоків супроводжується змінами пластового тиску та зростанням дебітів нафти, а також короткочасними періодами інтенсивної дегазації гірських порід [44]. Слід зазначити також перерозподіл напруг та деформацій геосередовища під час викидів пружної енергії. Ці факти дають підстави припустити можливість виникнення аналогічних відгуків геологічного середовища та техногенних впливів.

Стало ясно, що розробка нових, більш ефективних технологій видобутку нафти і газу вимагає ширшого підходу до аналізу нелінійних, неоднорідних та нерівноважних процесів у складних геомеханічних та гідродинамічних системах нафтогазоконденсатних родовищ [83].

Метою такого аналізу є встановлення характеру та дослідження процесів взаємодії та перетворення фізичних полів різного походження, і насамперед пружних полів, полів деформацій та напруг. При цьому може бути поставлено найважливіше завдання дослідження енергетичного балансу в продуктивних пластах: оцінка потенційної пружної енергії пласта, ступеня розрядки пружних напруг у процесі експлуатації, а також розробки методів її компенсації за рахунок накладання вторинних хвильових технічних полів, створюваних різними способами в геосередовищі [35, 44]. У зв'язку з цим слід розглядати два типи пружних та деформаційних полів: природних, успадкованих напруг, що виникли в процесі попередньої тектонічної діяльності, та штучно створюваних техногенних полів.

Це особливо важливо, оскільки розширення класу об'єктів експлуатації, залучення у розробку неоднорідних багат шарових покладів, тонких пропластків, блокованих зон пласта, родовищ [81, 82] та інших. із застосуванням традиційних технологій найчастіше недостатньо ефективні. Це, зокрема, дискретністю, зразковим характером їх застосування, тоді як накопичення і перетворення пружної енергії в пластах вимагають тривалого циклічного збудження гідродинамічних процесів у колекторах. У цих випадках можуть бути створені, зокрема, умови для пластової сегрегації флюїду перетоків УВ з погано дренованих пропластків проникні за рахунок вертикальних градієнтів пружних полів.

Значні проблеми виникають розробки нафтових об'єктів нефтегазоконденсатних родовищ, що пов'язані з складністю їх гірничо-геологічних і гідродинамічних умов. Зокрема, газонафтова поклад Яблунівського НГКР знаходиться у промисловій експлуатації з 1984 р., свердловини працюють у режимі періодичного газліфту та представляють нерівноважну динамічну систему разом із пластом.

Розробка покладу здійснюється на стадії падіння видобутку з 2008 р. Інтенсифікація роботи свердловини в цих умовах на ділянках з розвиненою тріщинуватістю, де великі ризики передчасного обводнення, за допомогою технології хвильового впливу повинна здійснюватися на основі збереження динамічної рівноваги в цій системі. Порушення такої рівноваги призводить до прориву газу, ретроградної конденсації, інших небажаних наслідків. Ці обставини повинні враховуватись при розробці хвильової технології інтенсифікації продуктивних пластів у покладах з такими особливостями [33, 34, 66].

Ускладнення умов розробки газонафтових родовищ вимагає підвищеної уваги до вдосконалення всього технологічного комплексу, що включає також і технології закінчення, освоєння свердловин, виклику притоку, процесу видобутку та ін. Відомі, зокрема, проблеми так званих «пропущених» пластів не могли бути виділені або ідентифіковані у розрізі свердловин через недосконалість існуючих технологій. Саме з цими обставинами пов'язані останні

невдачі американських буровиків в Індонезії [92], коли за рахунок неякісного розчину дуже складних колекторів були виявлені продуктивні інтервали у двох свердловинах, хоча згодом вони самостійно заробили з досить високим дебітом.

Нарешті, останнім часом виникли серйозні питання щодо застосування технології хвильового впливу у зв'язку із зростаючими обсягами робіт із залучення у розробку родовищ із новими нетрадиційними типами резервуарів – метанокутних та сланцевих (США).

Передумовами застосування спеціальних технологій впливу на вугільні пласти та сланцеві поклади є вкрай неоднорідні колектори, низькі пластові тиски, обводненість та ін. Крім того, гірничогеологічні особливості таких родовищ дозволяють припустити, що на відміну від нафтових і газоконденсатних родовищ стан привибійної зони не причиною низької інтенсивності приток вуглеводнів. З більшою мірою ймовірності можна сказати, що основне значення мають газодинамічні процеси в обсязі віддалених зон пласта, що підтверджується існуючими даними про характер насичення та фільтрації газової фази через такі відкладення. Запаси газу цих родовищ приурочені до тріщинуватим колекторам у сланцевих та сланцево-глинистих відкладах та у мікропорах вугілля. Метан вугільних пластів сорбований вугіллям або зацементований у найдрібніших тріщинах. Газовмісна система утворена розривними тріщинами, тектонічною тріщинуватістю і площинами. У зв'язку з цим для вилучення вугільного метану необхідно розкривати тріщини та створювати умови для перетікання газу [65].

Колектори такого типу створюють значні проблеми при бурінні (низький темп поглиблення, поглинання бурового розчину) та закінченні свердловин, у процесі яких без тривалих випробувань продуктивні інтервали можуть бути легко пропущені.

Зазначені особливості цих родовищ визначили застосування таких способів збудження продуктивних пластів, які забезпечують створення тріщин останніх. Зазвичай такі способи засновані на застосуванні вибухів великої потужності - накладних зарядів на поверхні (родовище Бік-Санді, р. В. Кентуккі, США) та вибухів торпед у свердловині (родовище Хевенер-Рен, м. Огайо, США).

Недоліки методів потужного вибухового впливу пов'язані з високою небезпекою проведення робіт та низькою ефективністю їх у слабких колекторах. Виходячи з цього перевагу може бути віддано хвильовим неруйнівним технологіям, що працюють в галузі пружних деформацій.

Проблеми, пов'язані із залученням у розробку високорозчленованих, тонких, погано дренованих пластів, вимагають удосконалення технологій освоєння та кріплення свердловин [4, 31, 39, 41]. Способи розв'язання задачі, охарактеризованої вище як проблеми "пропущених" пластів, можуть бути доповнені технологіями хвильового впливу при кислотних обробках, при створенні депресій на пласт, при кріпленні свердловин з метою покращення якості зчеплення цементу з колоною та породою.

Таким чином, спектр застосування технологій інтенсифікації притоків нафти і газу на основі інноваційних хвильових технологій досить широкий, а потенційні можливості цих технологій вимагають розвитку робіт з їхнього теоретичного обґрунтування та практичної реалізації.

1.2. Роль існуючих методів інтенсифікації припливу нафти і газу в нафтогазовидобутку

Досвід світової нафтової та газової промисловості показує, що в процесі розробки та експлуатації родовищ продуктивність свердловин знижується в часі, особливо на стадії видобування, що падає.

Причинами цього є падіння пластового тиску, обводнення свердловин, зміна фільтраційних властивостей колекторів привибійної зони. Практикою виявлено, що після закінчення буріння при розтині продуктивних пластів та освоєнні свердловин внаслідок різних фізикохімічних процесів початкова гідродинамічна рівновага порушується, і в продуктивному пласті утворюються дві зони: ближня (привибійна) зона та дальня зона пласта. Властивості їх суттєво відрізняються. Це має важливого значення щодо продуктивності свердловини з низки причин:

- проникнення в породу колектора інфільтрату бурового розчину, що

призводить до кольматації приви́бійної зони;

- зниження фазової проникності для нафти внаслідок обводнення колектора, виділення вільного газу і т.д.;

- порушення термодинамічної рівноваги системи «свердловина – пласт»;

- утворення водонафтових емульсій, що погіршують проникність колектора;

- прояви сейсмoeлектричного ефекту Іванова (утворення подвійних електричних верств) тощо.

Ці основні, а також ряд інших факторів, що супроводжують весь цикл будівництва свердловини, істотно впливають на її продуктивність. При цьому фільтраційно-ємнісні характеристики приви́бійної зони пласта і дальньої (видаленої) зони продуктивного пласта значно відрізняються як між собою, так і в порівнянні з природним станом пласта, не розкритого свердловиною. У зв'язку з цим слід, очевидно, окремо розглядати способи відновлення ФЕС приви́бійної зони та підтримки гідродинамічних режимів роботи далеких зон пласта.

Різні аспекти цієї проблеми вирішувалися протягом тривалого часу роботами відчезняних та зарубіжних учених. Зокрема, вивченню складного напружено-деформованого стану (ПДВ) приви́бійної зони пласта присвячені роботи К.С. Баснієва, Ю.П. Жовтова, А.Х. Мирзаджанзаде, В.М. Миколаївського, К. Терцаги, С. Пірсона, Р.С. Яремійчука, ІС Maxwell, SA Murill, WW Rubey та ін [32, 45, 61].

Дослідженню фільтраційних та термічних властивостей ПЗП, а також вивченню кольматаційних процесів у продуктивних пластах присвячені роботи Ю.В. Вадецького, Г.Г. Вахітова, Ю.П. Жовтова, С.І. Іванова, А.Х. Мирзаджанзаде, М.Л. Сургучова та ін [32, 35, 61].

Питання закінчення свердловин, первинного та вторинного розтину пластів та освоєння свердловин, що мають найважливіше значення для ефективної експлуатації свердловин, розглядалися Р.Ю. Кузнєцовим, Ю.С. Кузнєцова, Ю.А. Колодяжним, І.М. Мельникова, Ю.А. Мікліним, Є.Б. Соловкіним [4, 31, 39, 41]. До цих досліджень належить також розробка кульових

і кумулятивних перфораторів, а останнім часом - щілинних та гідропіскоструминних перфораторів.

Серед методів стабілізації та збільшення видобутку нафти та газу особливе місце посідають методи інтенсифікації приток, значний внесок у розробку яких зробили В.Є. Андрєєв, Ф.С. Абдулін, Т.І. Атакулов, І.М. Гайворонський, Р.Х. Гільманова, Г.С. Дубинський, С.І. Іванов, Ю.А. Котенєв, Р.М. Кондрат, Н.І. Хісамутдінов, К.Ш. Ямалетдінова, IL Rears, E. Breger, M.M. Monacher, Ch. U. Morris, DD Hill. Вони можуть бути поділені на декілька груп: хімічні способи обробки ПЗП, у тому числі кислотний і термогазохімічний вплив, гідродинамічні методи, в т.ч. гідророзрив пласта, гідропіскоструминна перфорація, імпульсна дія, багаторазова миттєва депресійно-репресійна дія, та фізичні методи, серед яких істотне значення мають хвильові технології, яким присвячені праці Є. Андрєєва, Р.Ф. Ганієва, А.Г. Гумерова, В.П. Дибленко, Ю.Ф. Жуйкова, І. Іванова, Ю.С. Кузнєцова, Р.Ю. Кузнєцова, О.Л. Кузнєцова, Ю.А. Котенева, Р.Я. Кучумова, І.Т. Міщенко, Г.В. Рогоцького, Е.М. Сімкіна, Л.Є. Української, І.С. Файзулліна, і т.д. [16 - 19, 25, 29, 37, 39, 44, 45, 48, 49,86].

На вирішення завдань інтенсифікації пласта спрямовані сьогодні зусилля провідних світових компаній, насамперед Schlumberger, Halliburton, Otis Engineering Corp., Lins, які входять до корпорації Baker, та ін Дослідження з обґрунтування та створення хвильових методів проводяться в Науковому центрі нелінійної хвильової механіки та технології [35, 63, 64].

Слід сказати, що така класифікація методів на продуктивні пласти носить, певною мірою, умовний характер, оскільки, по-перше, який завжди існує чітка грань між фізичними і хімічними ефектами впливу, і, по-друге, нині виник цілий ряд комплексних або багатofакторних технологій, що поєднують методи різних груп, наприклад, термохвильовий вплив на пласт і т.п.

Оскільки метою даної роботи є розробка багатofакторних хвильових технологій супроводу, то в ній буде дана характеристика інгредієнтних складових технологій з метою обґрунтування їх включення до складу загальної багатofакторної технології.

Хімічні методи на привибійну зону [35] застосовують у переважній

більшості випадків з метою інтенсифікації роботи пласта за рахунок збільшення його ФЕС за допомогою реакції гірської породи з кислотою, а також за рахунок зниження сил міжфазного поверхневого зчеплення.

Залежно від застосовуваної при обробках кислоти останні поділяються на соляно-кислотні, сульфамінокислотні, глино- та вуглекислотні.

Залежно від технологічної схеми, кислотні обробки можуть бути імпульсними, струминними, пінокислотними, термохімічними глибокими або вибірковими. Для посилення ефектів кислотних обробок вони можуть поєднуватися з динамічними методами, зокрема гідровібраторами.

Потенційні можливості та прогнозований ефект комплексної технології кислотної обробки та хвильового впливу визначаються фізико-хімічними особливостями процесів розчинення, швидкість і повнота яких багаторазово збільшується внаслідок взаємного переміщення при хвильовому впливі розчинника (кислоти) і твердої фази (гірської породи), що розчиняється. При хвильовому впливі взаємне переміщення скелета колектора і розчинника, що насичує його, виникає при проходженні в пласті збуджуваної пружної хвилі, що створює деформацію стиснення-розтягування і зсуву, що викликає взаємні зміщення стінок порових каналів і тріщин з обтіканням їх «свіжими» порція.

Останнім часом все більше зростає інтерес до теплових методів впливу на продуктивні пласти (внутрішньопластового горіння, стаціонарного та імпульсного термогазохімічного впливу). Це з залученням до розробки високов'язких нафт, бітумінозних відкладень та інших. [32]. Ці процеси можуть бути інтенсифіковані при поєднанні цих технологій з хвильовим впливом. Суть такого комплексування ґрунтується на наступних передумовах.

Теплові поля, створювані в неоднорідних за фізичними властивостями гірських породах, мають дуже неоднорідну структуру. Теплові потоки утворюють у пласті «мови», які, у свою чергу, огинають та замикають зони з малою теплоємністю, створюючи блоковані зони та ділянки із защемленими вуглеводнями. Залучення у розробку запасів УВ цих зонах з допомогою дифузії і конвекції, створюють теплові потоки і масопереноси з «холодних» зон пласта, у природних умовах є дуже повільним процесом з низьким коефіцієнтом

корисної дії (ККД). Дифузійні та конвективні процеси у пласті істотно прискорюються при накладенні хвильових полів [42, 61]. Під дією пружних імпульсів легші фракції (краплинна нафта, бульбашки газу) відповідно до рівняння Прандтля, набувають більшого прискорення

$$\frac{du_n}{df} = K \frac{du_s}{df}, \quad K = \frac{\rho_s}{\rho_n},$$

де u_n, u_s , - швидкість крапель відповідно нафти та води;

ρ_n, ρ_s - відповідно щільність нафти та води.

Таким чином, легкі фракції прискорюються в K разів більше проти водою чи важкими фракціями.

У зв'язку з цим в області пласта, охопленої хвильовим впливом, виникає дифузійний процес, коли важка нафта з нижніх шарів піднімається до покрівлі, заміщаючи «вибиті» пружними імпульсами легкі фракції, а легкі фракції із зон за межами теплової плями фільтруються в підошовну частину у покрівлю важких фракцій.

Особливістю теплового впливу є процес прогрівання пласта ВВ (нафтою, газом), що витісняється, з первісною пластовою температурою, тобто. рух теплового фронту блокується холодною прифронтною зоною. Як наслідок, при тепловому впливі зростають енергетичні витрати на додатковий прогрів з метою підтримки енергії, що втрачається на межі теплового фронту.

Збільшення його інтенсивності досягається шляхом хвильового впливу, сфокусованого на зону, що включає теплову пляму (область пласта в межах теплового фронту) плюс ділянку холодного пласта в прифронтній зоні. Кордон цього холодного ділянки встановлюється з відривом довжини пружної хвилі перед тепловим фронтом. Отже, для забезпечення ефективної теплової дії необхідно сконцентрувати хвильове поле у межах теплової плями. Інакше висловлюючись, розміри зон теплового і хвильового впливів повинні збігатися.

Таким чином, умова ефективної взаємодії теплового та хвильового полів досягнуто при накладенні цих полів в обмеженій області пласта. При виконанні цієї умови, що забезпечує ефективну взаємодію полів, легкі фракції пластових вуглеводнів у теплій зоні будуть розганятися у хвильовому полі і «бомбардувати» УВ-фракції холодної зони, забезпечуючи термоенергетичний

обмін і масоперенесення між прогрітою і холодною частинами пласта. Це забезпечить прискорений рух теплового фронту, а також тепло- та масообмін із блокованими зонами при суттєвому скороченні теплових втрат.

Особливе місце серед технологій інтенсифікації припливу нафти і газу займає гідророзрив пласта, сутність якого полягає в штучному створенні в продуктивному пласті розривних (диз'юнктивних) порушень у вигляді тріщин досить великих ширини та протяжності внаслідок нагнітання в свердловину рідини (води, нафти) або піноподібного агента]. Технологія ГРП і двох основних етапів: створення тріщин у пласті і закріпленні їх піском чи пропантом.

Основні проблеми ГРП полягають у наступному:

- мала тривалість життя тріщин, що знову утворилися;
- труднощі, пов'язані із залученням у розробку погано проникних пропластків при гідророзриві тонкошарового колектора;
- недостатньо висока провідність створюваних при ГРП тріщин через їх змикання повністю або частково;
- неможливість створення циклічних впливів (повторних ГРП) з метою «розхитування» тріщинуватий масив;
- збільшення неоднорідності пласта через виникнення протяжних тріщин та розриву і, як наслідок, зниження нафтогазовіддачі пласта [35,44,61].

Подолання зазначених труднощів може бути здійснено, мабуть, за рахунок застосування паралельно з ГРП інших динамічних методів впливу на геосередовище, що підсилюють або доповнюють ефекти гідророзриву, зокрема шляхом хвильового впливу.

Поряд із позитивними ефектами, що реалізуються при проведенні робіт за допомогою охарактеризованих вище технологій інтенсифікації приток УВ, вони мають кілька загальних недоліків та обмежень, до яких належать:

- висока вартість робіт за нетривалого періоду прояву ефекту разового впливу, що призводить до зниження ефективності щодо питомих витрат на одиницю продукції;
- неможливість прямого впливу на тупикові зони, защемлені вуглеводні в блокованих зонах та ін;

- підвищена екологічна небезпека, пов'язана із забрудненням ґрунту, повітряного та водного середовищ, водоносних горизонтів кислотами, розчинниками, поверхнево-активними речовинами (ПАР);

- незворотні зміни механічної цілісності та структури пластів;

- можливе обводнення пласта підшовними та законтурними водами при невдало проведених ГРП.

Можливість усунення або зниження впливу цих недоліків ґрунтується на загальнотеоретичному та спеціальному аналізах взаємодії хвильових полів з геосередовищем, а також на існуючому досвіді промислового застосування хвильових методів впливу.

Принциповою особливістю хвильових методів є можливість дистанційного пружного, що не руйнує, багаторазово повторюваного впливу на об'єкти нафти і газу як у привибійній, так і у віддаленій зонах пласта.

Привабливість хвильових технологій впливу на пласт як у їх потенційних можливостях, так і щодо подолання зазначених проблем збудження пласта призвела до широких наукових досліджень та розробки численних способів їх практичної реалізації, зокрема, за місцезнаходженням джерела збудження хвильового поля: на поверхні землі та у свердловині .

Серед усіх методів та модифікацій інтенсифікації притоків продуктивних пластів за допомогою хвильового впливу технологія віброейсмичного впливу [29, 44] з поверхні землі на продуктивні відкладення є найбільш раціональною з технологічної та економічної точок зору, т.к. вона мобільна, не залежить від сітки розробки і не має обмежень, пов'язаних з конструктивними особливостями свердловин при виборі під вплив хвильовими методами, що використовують свердловинні хвильові джерела. Характеристики витіснення, що відбивають ефективність віброейсмичного впливу, показано рисунку 1.3.

Технологія впливу з поверхні має принципові обмеження через недостатню потужність, що передається в пласт при хвильовому впливі, внаслідок значного поглинання енергії в породах, що перекривають, на шляху «поверхня землі - продуктивний пласт».

Спроби виконання таких робіт здійснювалися на Північному Кавказі за

допомогою наземних вібраторів СВ-10/100²⁰ та ЦВО-100. У процесі цих робіт не отримано прямого збільшення приток, але в той же час виявлено нові ефекти хвильового впливу на гірську породу та нафтогазові поклади: перерозподіл ПДВ геосередовища, дегазація геосередовища та пластової рідини, зміна фізичних властивостей пластового флюїду, зокрема зменшення вмісту твердих фракцій.

Охарактеризований спосіб є, мабуть, єдиним способом на пласт з поверхні землі. Є відомості про застосування США на ранніх стадіях розвитку методів інтенсифікації накладних зарядів вибухових матеріалів, що підриваються в траншеях поблизу свердловин. Такі технології є екзотичними і не набули промислового розвитку.

Решта, дуже численні, методи хвильового на продуктивні пласти тим чи іншим чином пов'язані з роботами в свердловинах [29, 35]. Серед цих методів можуть бути виділені дві нерівнозначні за кількістю складових їх методів групи.

Перша нечисленна група включає методи, що ґрунтуються на дії з гирла свердловини. До цієї групи належать методи гідравлічного та пневматичного імпульсно-ударного впливів. При цьому збуджуються імпульси тиску в стовпі рідини для промивання, які передаються по ньому в ПЗП. Однак, незважаючи на використання пульсацій з великою амплітудою коливань тиску, ефективність передачі їх до забою невелика через демпфування коливань імпульсів у породах, що перекривають. В силу цих обставин налаштування частоти вимушених коливань стовпа рідини на власну частоту пласта також проблематичне.

Інший основний спосіб цієї групи пов'язаний з вібросейсмічним впливом на продуктивний пласт. У ньому реалізовано комбіновану технологічну схему, коли джерело коливань і випромінювач роз'єднано, при цьому джерело знаходиться на поверхні, а випромінювач - у ПЗП. Обидва ці елементи з'єднані хвилеводом - колоною насосно-компресорних труб (НКТ). На верхню частину НКТ через оголовник і шабот діє ударна сила сталевого бойка-сердечника індукційної котушки, що розганяється в електродинамічному полі. Пружна поздовжня хвиля, що збуджується при ударі, поширюється по хвилеводу до випромінювача, зацементованого в ПЗП, трансформується в хвилю перпендикулярного хвилеводу напрямку і впливає на ПЗП. Цей спосіб дозволяє

реалізувати безпосередній механічний ударний вплив на пласт, але є нетехнологічним,

Друга група методів інтенсифікації пов'язана з безпосереднім впливом на ПЗП із використанням свердловинних джерел. До цієї групи входять віброхвильові, імпульсно-ударні, акустичні, електромагнітні методи.

Віброхвильові методи [46] є практично родоначальниками хвильових технологій. Тут застосовуються вібратори, що використовують гідродинамічний напір води, що закачується з поверхні.

До акустичних методів [44] належать методи впливу пружними коливаннями, що формуються безпосередньо в ПЗП за допомогою магнітострикційних перетворювачів, на частотах 19...25 кГц. Великий коефіцієнт загасання таких високочастотних коливань обмежує радіус на ПЗП першими десятками сантиметрів.

Електромагнітні методи [29] засновані на обробці ПЗП потужними імпульсними полями, утвореними в міжелектродному просторі свердловини, причому одним із електродів є обсадна колона. Вплив електричними імпульсами на геосередовище призводить як до оборотних, так і до незворотних змін структури порового простору за рахунок укрупнення капілярів, розглинізування пласта і т.п.

Імпульсно-ударні методи ґрунтуються на використанні ударної хвилі, що викликає зміну структури порового простору ПЗП. Ударна хвиля створюється з допомогою енергії вибуху спеціальних зарядів.

Серед таких методів найбільшого поширення набули термогазохімічний вплив та технологія розриву пластів із застосуванням порохових генераторів тиску [35]. На відміну від останнього методу, ТГХВ працює з флегматизованими вибуховими речовинами з тривалим часом горіння, внаслідок чого ТГХВ має лише тепловий та фізико-хімічний вплив без розриву пласта.

Загальним недоліком всіх «руйнівних» технологій впливу на пласт, таких як гідророзрив останнього і вибуховий розрив із застосуванням порохових генераторів, або рідких вибухових речовин, є недостатня довжина тріщин через швидке згасання розривного бризантного зусилля. З метою подолання цього

обмеження на родовищах Техасу було реалізовано метод розриву пласта «vibrofrac», заснований на багаторазовому ударному впливі та накопиченні енергії розривних зусиль. Внаслідок цього цуги хвиль тиску змушують періодично зміщуватися стінки тріщин, продовжуючи їхнє життя і забезпечуючи збільшення проникності ПЗП. Тим не менш, широкий розвиток методів вибухового розриву пластів стримується їх складністю, недостатньою надійністю та проблемами безпеки.

Завдання реалізації технології гідророзриву із застосуванням об'ємного хвильового впливу як засобу безперервного збудження тріщин, що створюються, вільного від зазначених недоліків, поставлене в цій магістерській роботі і розглядається в розділі 4.

Проміжне положення у системі класифікації хвильових методів займають методи на продуктивні пласти з допомогою свердловинних джерел хвильових полів. Справа в тому, що технологічна схема реалізації цих методів передбачає встановлення джерел безпосередньо в свердловині в інтервалі перфорації продуктивного пласта [45]. Проте режими на привибійну зону і хвильового на віддалені зони пласта істотно різняться, і часто ці два види впливу неможливо знайти реалізовані лише у технологічній схемі. Спробу подолання таких протиріч зроблено у цій роботі з урахуванням об'ємно-просторових хвильових технологій. Тому в даному розділі розглянуті лише дві технології, що тією чи іншою мірою відповідають підходам, що розвиваються тут.

Однією з таких технологій є дилатаційно-хвильова дія. Метод заснований на реалізації двох одночасних процесів у видобувній свердловині: утворенні зони розуцільнення порід (дилатації) за рахунок розвантаження ваги колони НКТ на породи зумпфу та збудження в ПЗП низькочастотних пружних коливань стовпом свердловинної рідини під час роботи штангового насоса. Поєднання статичної зони розвантаження воронки напруг, що викликає дилатацію вище продуктивної товщі, і хвильових процесів, що впливають на тріщини і капіляри в розуцільненій товщі, призводить до підвищення продуктивності свердловин. Недоліками способу є складність його технічної реалізації та неможливість регулювання та управління процесом впливу.

Цей принцип хвильової дії на продуктивні пласти, який отримав у деяких роботах назву сейсмоакустичного, створений

О.Л. Кузнецовим, І.С. Файзулліним, Г.В. Рогоцьким [44]. Традиційне застосування цієї технології ґрунтується на збудженні пружних коливань з основною частотою спектру 5...20 Гц. При цьому використовуються ефекти гідроімпульсного впливу на пласт, що збуджується електроіскровим розрядником, що опускається в свердловину. Значна потужність, що спрацьовується в імпульсі (до 20 МВт), дозволяє здійснити не тільки прямий імпульсноударний вплив у свердловинній зоні (включаючи ПЗП), але і збудити в резонансі стоячу і потужну каналову хвилю, яка поширюється в хвилеводі - продуктивному пласті - і продуктивному пласті - розвантаження зон напружено деформованого стану. Другий із названих ефектів реалізується найбільш повно, якщо вплив здійснюється у свердловинах, що знаходяться всередині або поблизу тектонічних сейсмоактивних зон.

Принципи, реалізовані у цій технології, покладено основою розробленої в магістерської роботи технології об'ємного хвильового впливу.

Охарактеризовані технології призначені для підвищення ефективності розробки продуктивних пластів родовищ, що експлуатуються. Продуктивність свердловин, обсяг і повнота дренажу пласта значною мірою залежать від ефективності робіт по закінченню свердловин: якості розкриття пласта і виділення продуктивних і водонасичених інтервалів, повноти освоєння свердловин та ін. газу і включають циклічні депресії, комплексування, кислотні обробки, міні-фраки та ін.

На вирішення цих вельми складних проблем, що включають також оцінку зміни насичення зон вуглеводнями з часом, виявлення зон повторного насичення, оцінку зміни або зміщення водонафтового контакту (ВНК) та газоводяного контакту (ГВК) у процесі заводнення за підтримки пластового тиску (ППД), спрямовані нині зусилля провідних світових компаній, насамперед Шлюмберже, Халібертон, Бейкер Хьюз та ін [92]. Але надійність цих методів часто виявляється недостатньою через варіабельність гірничо-геологічних умов. Зокрема, проникнення інфільтрату пласт може бути настільки значним, що

виділення продуктивних зон стає практично неможливим навіть з використанням найбільш досконалого комплексу АВС Шлюмберже. У цьому випадку застосування нетрадиційних технологій хвильового впливу у комплексі зі стандартними геофізичними дослідженнями свердловин (ГІС) має мінімізувати ризики хибних рішень. Питання такого комплексування розглядаються у розділі 4 магістерської роботи.

Зазначені особливості методів хвильового впливу (універсальність, пружний характер деформацій, інтегрованість у технологічні комплекси) дозволяють припускати успішність їхнього інноваційного застосування при вирішенні низки нових нетрадиційних завдань. До них належить інтенсифікація приток вуглеводнів нафтових облямівок, метаноугольних і сланцевих пластів.

Рівні робіт з кожного з цих напрямів суттєво відрізняються.

Актуальним на даний час питанням видобутку вуглеводнів з нетрадиційних джерел – метанокутних та сланцевих резервуарів – присвячені праці вчених М.В. Голіцина, Н.А. Гафарова, О.М. Дмитрієвського, С.С. Золотих, А.М. Карасевича, С.М. Карнаухова, В.П. Куленкова, В.Г. Натура, М.А. Політикиної, Н.М. Сторонського, А.М. Мастепанова.

Завдання підвищення ефективності відбору газу з глинистих, сланцевих, вугільних пластів, у тому числі із застосуванням хвильових технологій, є дуже важливими, але новими завданнями. Очевидно, крім вибухового збудження таких колекторів накладними і свердловинними зарядами вибухових речовин робіт у цій сфері поки що не проводилося, що є додатковим обґрунтуванням важливості досліджень, що проводяться в дисертаційній роботі щодо впливу на такі пласти.

Проблеми, пов'язані з розробкою нафтових облямівок НГКР, дуже різноманітні, що визначається, насамперед, складністю та специфікою цих об'єктів розробки для різних родовищ. Зокрема, стосовно ГКР розробка нафтової облямівки газонафтового покладу ведеться на природному режимі періодичним газліфтом. Складність розробки полягає також у виснаженні енергії природної газової шапки родовища за умов безперервної зміни газового фактора. У зв'язку з цим зазначені у розділі 4 способи розробки технології хвильового на нафтову

оторочку повинні здійснюватися з урахуванням цих особливостей.

Висновки за розділом 1

1. В результаті проведеного аналізу встановлено, що на цей час створено значну кількість методів інтенсифікації продуктивних пластів нафтогазоконденсатних родовищ. Більшість їх застосовується розробки нафтових родовищ. Значно менше розробок виконано для газових родовищ, поодинокі роботи – для нафтових облямівок ГKM за повної відсутності технологій для нетрадиційних метанокутних та сланцевих родовищ.

2. Виявлено, що з усіх методів інтенсифікації продуктивних пластів найінтенсивніше розвиваються технології хвильового впливу.

3. Встановлено, що переважна більшість цих методів пов'язана з реалізацією прямих ефектів хвильового впливу в свердловинах на привибійну зону пласта.

4. Методи, що використовують аномально збуджувані ефекти дистанційного хвильового впливу загалом деякі ділянки (блоки) пласта, мають важливого значення щодо збільшення продуктоотдачі, перебувають у стадії розробки. Серед них найсерйозніше теоретичне обґрунтування та практичну реалізацію має сейсмоакустична технологія.

5. У зв'язку із закономірним виснаженням світових ресурсів вуглеводнів роль хвильових технологій, що мають цілу низку унікальних можливостей щодо інтенсифікації процесів видобутку нафти і газу, зростатиме, що визначає важливість та актуальність робіт зі створення таких технологій, і особливо тих, які забезпечують більший хвильовий вплив на пласт.

2. ТЕОРЕТИЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ТА ГЕОЛОГОТЕХНОЛОГІЧНІ ПЕРЕДУМОВИ СУХОВИХ ХВИЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ВПЛИВУ НА ПЛАСТ

2.1. Основні характеристики хвильових полів, що збуджуються

Способи реалізації технологій хвильового супроводу процесів розробки нафтових, газових, газоконденсатних та метанокутних родовищ визначаються двома головними факторами: місцем проведення хвильового впливу та сейсмологічними характеристиками об'єкта для впливу.

У розділі 1 розглядалися два основні випадки застосування хвильового впливу: збудження пружних хвиль із поверхні землі або у внутрішніх точках геосередовища.

У першому випадку нижній напівпростір необхідно розглядати як безмежне геосередовище, однорідне в першому наближенні, і гетерогенне, шарувате середовище, більш відповідне фактичній моделі. Така модель середовища дозволяє більш адекватно описувати процеси, що відбуваються в дальній зоні пласта, і може застосовуватися для технології об'ємного хвильового впливу, що розробляється в магістерській роботі.

У другому випадку, при проведенні хвильового впливу у внутрішніх точках геосередовища, досліджуються особливості хвильового поля, що збуджується в обмеженій області продуктивного пласта, що визначається як привибійна зона пласта, при визначенні якої приймається модель насиченого пористого середовища (НПС).

Моделі безмежної та шаруватої середовищ [10, 11] є складовими частинами загальної моделі при об'ємному хвильовому впливі. У гірських породах, як і в усіх твердих тілах, під дією прикладених до них сил відбувається деформація, що характеризує зміну форми тіла або взаємного розташування його частин. При цьому характер деформацій при хвильовому впливі в дальній та ближній зонах пласта істотно відрізняється:

у дальній зоні вони мають характер пружних деформацій, тоді як у ближній зоні

вони мають більш складну структуру, що включає пружні, пластичні (в т.ч. термічні) і розривні деформації.

Область пласта, що визначається як його привибійна зона, формується вже при розтині пласта свердловиною, розвивається і видозмінюється у процесі його розробки. Основними факторами, що визначають геомеханічні, термо- та гідродинамічні властивості ПЗП, є інфільтрація в пласт бурового розчину, перерозподіл напружено-деформованого стану гірських порід при розтині пласта з утворенням так званої «охоронної» зони - кільця ущільнених порід, виникнення п'єзо- та термоградієнтів в проміжков. зоні «свердловина – пласт» та ін. В силу діючих факторів та їх суперпозиції привибійна зона пласта знаходиться в метастабільному стані та характеризується інтенсивними процесами енергообміну та масопереносу в системі «свердловина – пласт».

Інтенсивність цих процесів настільки велика, що, незважаючи на незначні розміри ПЗП (за деякими оцінками, до 23 м [29]), вона дуже істотно впливає на процеси дренажу в продуктивних пластах.

Численні результати робіт з впливу на ПЗП [16] показують, що в результаті збудження ПЗП високочастотними хвильовими імпульсами змінюються фільтраційні процеси в пластах: знижується в'язкість флюїдів, підвищується змочуваність в порових каналах, змінюються фазові проникності пластових рідин, відбувається, розущільнення глинистих включень

Серед великої кількості способів на ПЗП при вирішенні завдання розробки багатофакторних технологій особливе значення мають ті, які можуть бути інтегровані в технологію низькочастотного об'ємного хвильового впливу на дальні зони пласта з блокованими запасами. Загальними точками цих технологій є низька основна частота спектра, висока потужність хвиль, що збуджуються, і пружний характер впливу на привибійну зону. Отже, комплексну технологію синхронного впливу неможливо знайти включені методи термогазохімічного, теплового, вибухового впливів, і навіть методи гідророзриву пласта. Поєднане хвильового впливу на ближню і дальню зони пласта має здійснюватися синхронно імпульсно-хвильовим методом. В той же час, обґрунтування технології об'ємного хвильового впливу вимагає розгляду особливостей

хвильового поля [78], що збуджується у великих об'ємах шаруватих середовищ нижнього на півпростору. Це поле може бути представлене у вигляді суми двох векторних полів [89]:

$$U = U_p + U_s, \quad (2.2)$$

де U - Вектор зміщення поля;

U_p , U_s - потенційні та вихрові складові поля, що володіють скалярним потенціалом $\phi(x, y, z, t)$ та вектор-потенціалом $\mathbf{A}(x, y, z, t)$.

З урахуванням цього вектор зсуву виражається у вигляді:

$$U = \text{grad } \phi + \text{rot } \mathbf{A}. \quad (2.3)$$

Потенційна складова пов'язана з поширенням поздовжньої хвилі P деформацій стиснення-розтягування, вихрова складова визначає поперечну хвилю S деформацій зсуву. За наявності в геосередовищі шарів на межах розділу виникає також хвиля релеївського типу.

У завданнях порушення пластів ці хвилі виконують різні функції. Хвиля стиснення-розтягування викликає зміну об'єму твердого скелета та газорідинної фази, а хвиля S - взаємне усунення стінок капілярних каналів та тріщин. Очевидно, що деформації цих двох видів забезпечують підвищення припливу пластової рідини за рахунок виникнення мініградієнтів тиску на фронті пружної поздовжньої хвилі, що розповсюджується в пласті, і зниження фільтраційних опорів за рахунок взаємних циклічних зсувів стінок капілярів і тріщин при проходженні поперечної хвилі. Отже, при розробці технології та технічних засобів хвильового впливу особлива увага має бути зосереджена на способах та пристроях збудження найінтенсивніших хвиль обох типів.

Оцінка енергоємності різних техніко-технологічних засобів хвильової дії може бути виконана із застосуванням методів класичної теорії поля, а також методів спеціальної теорії випадкових процесів [9,21, 75, 79].

Основні особливості хвильового впливу в області інтенсифікації приток продуктивних пластів полягають у використанні імпульсних джерел хвильового поля, що працюють у неоднорідних анізотропних насичених пористих геологічних середовищах [20].

Основні труднощі аналізу хвильових процесів, що розвиваються в

анізотропних гірських середовищах взагалі й у продуктивних пластах зокрема при хвильовому впливі, полягають у складному інтерференційному характері полів пружних хвиль. Внаслідок цього у кожній точці простору утворюється багатозначна функція аргументів (параметрів), пов'язаних із хвилями різного типу та різного походження [11, 40]. Завдання аналізу таких полів у конкретних практичних додатках до технології хвильового впливу вимагає нових, не використаних раніше традиційної сейсмозвідки підходів до аналізу хвильових явищ. Одним із можливих шляхів вирішення таких проблем є використання адаптованих до цього завдання методів теорії аналітичних функцій.

Характер взаємодії полів пружних хвиль, створюваних при хвильовому впливі на пласти та поля різного типу, насамперед поля швидкостей гідродинамічних фільтраційних потоків, що існують в обсязі геосередовища, може бути встановлений на основі просторового аналізу параметрів хвильових полів на родовищі.

При хвильовому впливі на кожну точку геосередовища (пласту) діють пружні сили, що утворюють в обмеженій частині простору силове поле. Дії, що діють у просторі, сили залежать від координат точки простору і від часу: $F(x, y, z, t)$ [40], і внаслідок цього хвильове поле при хвильовому впливі є нестационарним [1]. Оскільки в даному випадку робота сил поля залежить тільки від початкового і кінцевого положень об'ємів рідини, що переміщуються, і не залежить від траєкторії її переміщення, то силове поле є потенційним. При русі рідини в потенційному силовому полі під дією тільки сил поля мають місце закони збереження енергії, маси та кількості руху, що дозволяє, зокрема, досліджувати ефективність хвильових джерел та транзитні (наприклад, гідропровідність) властивості пласта.

Для потенційного поля вихор векторного поля $rot a=0$. Потенційна течія може мати місце за певних умов тільки тоді, коли відсутня тертя, рідина несжимаема, сили в'язкості малі і т.п.

Ці умови не виконуються для реальних рідин. Тому векторний аналіз хвильових полів, що збуджуються в геосередовищі, важливий для практичної оцінки хвильових явищ при хвильовому впливі. При цьому, якщо виконується

умов $rot a = 0$, то поле пружних деформацій є потенційним, і для нього $div a \neq 0$. Якщо виконується умова $rot a \neq 0$, то поле є соленоїдальним, і для нього $div a = 0$.

Таким чином, загалом векторний аналіз пружних полів при хвильовому впливі дає наступні критерії оцінки та оптимізації останнього:

$rot a = 0, div a \neq 0$ - потенційне поле;

$div a < 0$ - умова стоку;

$div a > 0$ - наявність джерела (витік);

$div a = 0$ - відсутність збурень;

$rot a \neq 0, div a = 0$ - соленоїдальне поле.

Через специфіку хвильового впливу в анізотропних середовищах утворюються складні хвильові поля, які є накладенням потенційних і соленоїдальних полів. При цьому оптимальним щодо інтенсифікації приток є створення в пласті інтенсивних джерел з максимальними дивергенцією та вихором поля. Тоді оптимізують функціонали можуть бути визначені $I_1 = \int div a / max$ $I_2 = \int rot a / max$. Виповнення цих умов означає досягнення максимальної щільності потоку та максимальної швидкості закручування потоку. Останнє може бути досягнуто технічними засобами - застосуванням «вихрових» хвильових джерел [40, 42, 71, 72].

Особливістю технології хвильового впливу є те, що аналіз хвильових полів, що збуджуються в гірському середовищі, і характеру зміни параметрів останніх у процесі розробки може здійснюватися в достатніх обсягах тільки при спостереженнях на поверхні землі. Поверхневі вимірювання технологічно та економічно особливо ефективно при масових моніторингових спостереженнях. За такого підходу виникає питання, якою мірою виміру хвильового поля лежить на поверхні землі відбивають його структуру та особливості динамічних процесів у нижньому напівпросторі, тобто. в обсязі геосередовища, що містить, зокрема, цільовий продуктивний пласт. Крім того, дія хвильового джерела в середовищі, зайнятій течією пластового флюїду, призводить до зміни характеру співвідношень динаміки пласта, що встановилися.

При цьому розглядаються скалярні та векторні поля. До перших можуть бути віднесені технологічні параметри пласта, отримані в окремих його точках (свердловинах): пластовий тиск, температура і т.п.

Векторне поле утворює безліч всіх векторів швидкостей частинок потоку пластового флюїду.

Гradient скалярного поля, дивергенція та вихор (ротор) векторного поля є основними диференціальними операціями аналізу хвильових технологій [89]. Ротор є векторною характеристикою обертальної складової векторного поля (або його «скручування»), причому ротор векторного поля $rot a$ має R, Q, P складові координати вектора a в базисі i, j, k .

Тоді

$$rot a = \left\{ \frac{\partial R}{\partial y} - \frac{\partial Q}{\partial z}, \frac{\partial P}{\partial z} - \frac{\partial R}{\partial x}, \frac{\partial Q}{\partial x} - \frac{\partial P}{\partial y} \right\}. \quad (2.4)$$

У цьому випадку, якщо поле a є поле швидкостей потоку рідини, то максимальна швидкість останнього буде відзначена у напрямку $rot a$, її величина дорівнює $1/2 |rot a|$.

Найважливішою характеристикою поля при хвильовому впливі є дивергенція.

Дивергенція $div a$ векторного поля $a(M)$, має у базисі i, j, k координати P, Q, R , визначається як сума:

$$div a = \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} + \frac{\partial R}{\partial z}.$$

Дивергенція поля характеризує зміну інтенсивності поля. Дивергенція є межа відношення потоку векторного поля через замкнуту поверхню, що оточує цю точку, до об'єму, обмеженого нею. Якщо розглядати векторне поле $a(M)$ як поле швидкостей в течії, що встановилася, стисливої рідини, то $div a$ у точці означає інтенсивність джерела за умови $div a > 0$ або стоку, що знаходиться в цій точці, при $div a < 0$ або відсутність джерела та стоку у разі $div a = 0$.

При аналізі хвильових процесів, що розвиваються при імпульсному впливі на продуктивні пласти або, в більш конкретному випадку, на замкнуті області пласта (наприклад, блоковані зони пласта, мови або тупикові зони), надзвичайно важливе значення мають два інтегральних співвідношення: формула

Остроградського і формула Стокса.

Формула Остроградського дає перетворення інтеграла, взятого за обсягом Π , обмеженому поверхнею Γ , в інтеграл, взятий по цій поверхні:

$$\iiint_{\Omega} \left(\frac{\partial X}{\partial x} + \frac{\partial Y}{\partial y} + \frac{\partial Z}{\partial z} \right) dXdYdZ = \iint_{\Sigma} Xdydz + Ydzdx + Zdx dy,$$

Де X, Y, Z - функції точки (x, y, z) , що належить тривимірній області Ω .

Особливе значення формули Остроградського при розробці та аналізі хвильових технологій впливу на продуктивні пласти, і особливо на обмежені ділянки пласта, що мають замкнуті межі (поверхні), випливає з гідродинамічного тлумачення цього співвідношення. Воно полягає в тому, що кількість рідини, що транспортується через оболонку (наприклад, межу блокованої зони)-2'в одиницю часу може бути визначено рівносильними способами:

- виходячи з інтенсивності (потужності, продуктивності) окремих (теоретично точкових) джерел, що заповнюють область. При цьому обсяг флюїду визначається виходячи з наведеної формули;

- виходячи із швидкості частинок потоку, що придбавається при хвильовому впливі в сукупності з пластовим вектором тиску, в момент його проходження через оболонку (граничну поверхню) Σ

При цьому кількість мігруючої рідини або газу визначиться на підставі тієї ж формули.

Це наслідок, що з формули Остроградського, має дуже важливе значення стосовно технології хвильового впливу, т.к. дозволяє визначити стоки або джерела на підставі подвійного інтегрування будь-якої поверхні області пласта (2.1).

Для аналізу пружних полів, створюваних у гірських середовищах при хвильовому впливі, важливе значення мають практичні програми, які з формули Стокса:

$$\iint (n, \text{rot } a) d\delta = \oint_{\gamma} (a, t) dl, \quad (2.7)$$

де a (М) - векторне поле, що диференціюється, що має безперервний вихор $\text{rot } a$;

Σ - поверхня;

n - одиничний вектор нормалі поверхні X ;

t - одиничний вектор щодо до кордону біля поверхні Γ ;

l - Довжина дуги u ;

ds -елемент поверхні Σ .

Формула Стокса стосовно ОХВ має наступний фізичний зміст: потік вихору векторного поля через поверхню Σ дорівнює циркуляції цього поля вздовж кривої (2.2).

Циркуляція швидкості течії пластової рідини чи газу є мірою завихреності течії, у своїй можливій такі випадки. Якщо циркуляція за будь-яким замкнутим контуром фільтраційного потоку дорівнює нулю, то перебіг буде потенційним (безвихровим): $\text{rot } v = 0$.

Якщо швидкість перебігу рідких частинок за будь-яким контуром має одну й ту саму величину, то перебіг буде мати форму прямолінійного вихору, при якому всі частинки рухаються по концентричних кіл з одним центром на осі вихору.

Якщо циркуляція за замкнутими контурами (усім або деякими) відмінна від нуля, перебіг рідини буде вихровим (повним або у відповідних областях).

Якщо при цьому перебіг має неоднозначний потенціал швидкостей, воно буде безвихровим, а й потенційним, як у першому випадку. Неоднозначність потенціалу означає існування в області течії замкнутих твердих частинок, наприклад, блокованих зон або мов. Таким чином, циркуляція поля є характеристикою неоднорідності гідродинамічних процесів у пласті до діагностичних ознак виділення зон хвильового впливу.

Використання формул Остроградського та Стокса дозволяє отримати енергетичні оцінки характеру хвильового впливу на продуктивні пласти.

На підставі формули Остроградського визначаються також характер поля на околицях промислових об'єктів, наявність джерел та стоків, величини потоків, інтенсивність джерел у даних точках.

З формули Стокса випливає, що найбільша робота хвильового поля, що здійснюється на межах промислових об'єктів, досягається при

найбільших значеннях потоку вихору *rot a* поля. Це, у свою чергу, доводить необхідність турбулізації пластових потоків за рахунок порушення вихрових хвильових полів, зокрема, з використанням вихрових свердловинних джерел.

Таким чином, промислові вимірювання параметрів роботи свердловин (дебіту, прийомистості, тиску і т.д.) можуть бути використані на основі наведених алгоритмів обробки з метою оцінки способів, параметрів, а також ефективності об'ємного хвильового впливу.

2.2. Особливості хвильових процесів у шаруватих неоднорідних середовищах

Крім гідродинамічних характеристик при розробці комплексних багатофакторних хвильових технологій найважливіше значення мають гірничогеологічні та фізико-механічні (геоакустичні) властивості розрізу гірських порід.

Шаруватість і шаруватість (перешаровування малопотужних тонких прошарків) геосередовища, які є неминучою властивістю осадових порід [11], відіграють надзвичайно важливу роль у розробці технологій хвильового впливу, особливо по відношенню до об'ємних хвильових впливів, що розробляються в магістерської роботи. При цьому продуктивні пласти-колектори, що містять у собі насичені пористі середовища, відрізняються в силу цих властивостей від порід, що вміщують їх вище- і нижчележачих за своїми фізикомеханічними і реологічними властивостями: нижча щільність і акустична жорсткість, підвищена пористість і тріщинуватість, проникність, п'єзо- та гідропровідність.

Такі пласти утворюють так звані хвилеводи, що володіють тією властивістю, що збуджена в них тим чи іншим способом хвиля, перевиражаючись від підшви і покрівлі пласта-хвилеводи і не виходячи з нього, охороняється і переносить енергію без істотних втрат на значні відстані.

Оскільки швидкість поширення пружних хвиль у хвилеводі менше, ніж у відкладеннях, що покривають і підстилають, то при віддаленні від джерела (при

великих кутах падіння хвиль на межі розділу) коефіцієнт відображення від межі шару і напівпростору значно зростає, і тому поширюється всередині шару хвиля при кожному акт відбиття слабшає лише незначно, і вся енергія, випромінювана джерелом, переноситься пружними хвилями всередині шару [11, 44].

Наявність хвилеводів у геологічних розрізах нафтогазоконденсатних родовищ має принципово важливе значення, по-перше, щодо інтенсифікації процесів фільтрації в продуктивних пластах і, по-друге, при вирішенні завдань впливу на тупикові зони та стругування блокованих ділянок у віддаленій області пласта за рахунок далекого перенесення пружною енергії у хвилеводах. Технологічні схеми хвильового впливу, що розглядаються в роботі, передбачають збудження каналової хвилі за допомогою джерела, що знаходиться як усередині, так і поза пластом (2.3).

Геологічні середовища, що містять родовища вуглеводнів, відносяться до шаруватих середовищ, що складаються із системи шарів, розташованих між двома напівпросторами. При цьому найбільш поширеним є випадок тонкошарового середовища, коли потужність шару порядку або менше довжини хвилі. Більш того, у ряді випадків присутні тонкошарові зони, коли між напівпросторами розташований багатшаровий продуктивний пласт. Такий випадок буде розглянуто далі під час аналізу технології інтенсифікації приток вуглеводнів метанокутних та сланцевих родовищ. Принциповою відмінністю таких зон є те, що в силу інтерференції хвиль, що виникають в окремих пластах, при хвильовому впливі утворюється сумарне хвильове поле, характерне для всієї товщі загалом. Порушення окремих тонких шарів із застосуванням існуючих технологій практично неможливе. У умовах найефективнішим є застосування запропонованої у магістерської роботи технології об'ємного інтегрального хвильового на всю товщу. Пласти гірських порід мають також інші дуже важливі геоакустичні властивості - власної частотної характеристикою [22, 77, 87]. Нелінійність пластових систем призводить

до того, що вони мають досить широкий набір власних частот, серед яких виділяється переважна частота, що визначається в ряді робіт [16, 35] як власна, резонансна або домінантна частота пласта. Пласти гірських порід мають також інші дуже важливі геоакустичні властивості - власної частотної характеристикою [22, 77, 87]. Нелінійність пластових систем призводить до того, що вони мають досить широкий набір власних частот, серед яких виділяється переважна частота, що визначається в ряді робіт [16, 35] як власна, резонансна або домінантна частота пласта. Пласти гірських порід мають також інші дуже важливі геоакустичні властивості - власної частотної характеристикою [22, 77, 87]. Нелінійність пластових систем призводить до того, що вони мають досить широкий набір власних частот, серед яких виділяється переважна частота, що визначається в ряді робіт [16, 35] як власна, резонансна або домінантна частота пласта.

При збудженні пласта імпульсною силою його коливання відбуваються саме у цій частоті. Якщо у пласті збуджується хвиля $Uu(t)$, має спектр $Su(\omega)$:

$$S_u(\omega) = \int_0^{\infty} U_u(t) e^{j\omega t} d\omega, \quad (2.8)$$

то спектр $Sn(\omega)$ що виникає у пласті хвилі $Un(t)$ буде визначено за формулою:

$$S_n(\omega) = K(\omega) \cdot S_u(\omega), \quad (2.9)$$

де $K(\omega)$ - частотна характеристика пласта.

Наявність резонансної (домінантної) частоти пласта зумовило розробку значної кількості технологій, заснованих на збудженні пласта цієї частоті, створюваної хвильовим джерелом. Однак на шляху цих технологій існують як мінімум два дуже серйозні обмеження.

По-перше, пласт як нелінійна динамічна система з розосередженими параметрами [74] має цілу низку власних частот, і визначення найбільш енергоємної (домінантної, за термінологією розробників) частоти становить значні труднощі або просто неможливо. По-друге, створення потужного тонального хвильового джерела, що працює на домінантній

частоті пласта, також дуже проблематичне з технічної точки зору. Зазначені обмеження усуваються авторами технології ОХВ за рахунок застосування імпульсного джерела великої потужності, що випромінює хвилі з широким спектром частот. Таке технічне рішення обґрунтовано тим обставиною, що тонкі пласти є частотним фільтром, і за будь-якого способу створення пружного поля пласт збуджується на частоті, що відповідає максимуму його частотної характеристики.

Сказане впливає з наступного співвідношення, аналогічного наведеному вище:

$$S_n(\omega) = S_e(\omega) - K(\omega), \quad (2.10)$$

де $S_n(\omega)$ - Спектр сигналу в пласті;

$S_e(\omega)$ - спектр збуджуваного сигналу;

$K(\omega)$ - частотна характеристика пласта.

Характер хвильових полів при збудженні пластів визначається великою мірою також характеристиками джерел хвильового поля.

За принципом дії та видом характеристики спрямованості застосовувані в наших роботах свердловинні хвильові джерела є комбінацією джерел типу центру розширення та зосередженої горизонтальної сили. При проведенні хвильового впливу в розчленованих шаруватих продуктивних товщах характеристика спрямованості формується і розтягується в горизонтальному напрямку через відому властивість природної спрямованості шаруватих середовищ [11, 24].

Серед усіх динамічних явищ у шаруватих середовищах найважливіше абсолютне значення мають стоячі хвилі (2.4). Вони утворюються при певних співвідношеннях між потужністю шару та довжиною хвилі:

$$H = (2k-1) \lambda/4, \quad (2.11)$$

де H – потужність шару; l -довжина хвилі; $k = 1, 2, \dots$

При виконанні цієї умови суперпозиція хвиль, відбитих від покрівлі та підосви пласта (як у разі хвилеводного розповсюдження), є стояча хвиля. При

цьому стояча хвиля швидкості описується виразом:³⁸

$$V = 2zA \cos Kx \sin \omega t, \quad (2.12)$$

а стояча хвиля деформації:

$$\Sigma = -2kA \sin kx \cos \omega t, \quad (2.13)$$

де z - частота; A – амплітуда.

Амплітуда деформації $[2kA \sin kx]$ максимальна у точці простору, де амплітуда зміщення $[2A \cos kx]$ дорівнює нулю, тобто. вузли деформації збігаються з пучностями усунення.

При цьому область пласта потужністю, що дорівнює чверті довжини хвилі ($\lambda/4$), між пучністю і вузлом деформації є енергетично замкненою областю, в якій двічі за період відбувається перетворення кінетичної енергії на потенційну. Принципово важливою особливістю цього процесу є те, що зазначені області не обмінюються енергією з сусідніми інтервалами і є замкненими областями безперервних енергетичних переходів. Потенційна енергія напруги, сконцентрована в процесі цих переходів в околиці вузлів стаціонарних хвиль, викликає періодичні деформації гірського середовища в таких областях пласта. Це призводить, у свою чергу, до виникнення процесів пульсуючого зміни (зменшення або збільшення) вторинної порожнечі (пористості, тріщинуватості) колектора.

Таким чином, виникає ніби поршневий ефект, що супроводжується виникненням локальних градієнтів тиску в пористому середовищі на тлі загального градієнта у напрямку областей відбору:

$$P_{\Sigma} = \Delta P_{пл} + \Delta P_{в} \quad (2.14)$$

де $\Delta P_{пл}$, $\Delta P_{в}$ - градієнти відповідно пластового та хвильового тисків.

Таким чином, пружна енергія, що транспортується в пласт при хвильовому впливі, відновлює виснажені її запаси в пласті, що призводить до уповільнення темпу падіння середньозваженого тиску. Це супроводжує як чисто газовий, і водонапірний режими роботи пласта.

Локальні перепади пластового тиску, викликані хвильовим процесом, що відбулися, відіграють вельми значну роль у виникненні динамічних сил в блокованих зонах покладу.

Умова стругування цілика визначається наступним співвідношенням тисків у продуктивному пласті:

$$P_c > \Delta P_{\psi} + \Delta P_{\nu} - P_k, \quad \Delta P_c > 0,.$$

де P_c - тиск стругування;

ΔP_{ψ} - Різниця тисків на межах цілика;

P_k - капілярний гістерезис тиску;

ΔP_{ν} - тиск на фронті хвилі.

Додатковим фактором, що забезпечує ефективність хвильового впливу, є наявність неоднорідностей у гірському масиві взагалі та у продуктивному пласті зокрема. Цей чинник сприяє як накопиченню потенційної енергії у пласті, і розрядці накопиченої енергії.

Таким чинником є, зокрема, тріщини у масиві гірських порід як природні, геотектонічні, і штучно створені при гидроразриве пласта. При накладанні полів пружних хвиль характер геомеханічних процесів змінюється [14].

При поширенні пружної хвилі коливання, створювані у сфері розривного порушення, впливають поверхню контуру макротріщини. При цьому до її вершини приурочені зусилля, що розтягують. Рівень напруг, що сконцентрувалися у вершині тріщини, за певних умов (збіг осі тріщини з напрямом головних напруг) може перевищувати межу міцності гірської породи, внаслідок чого відбуваються розвиток головної (магістральної) тріщини і виникнення великої кількості тріщин, що операють. Умовою виникнення цього процесу, що має лавиноподібний характер, є:

$$f_z - f_e < f_p$$

де f_z - гірничий тиск; f_e - напруга на фронті; f_p - розтягуюче зусилля.

Процес розформування застійних зон та залучення їх до розробки включає два етапи: по-перше, «просочування» газу з заблокованої ділянки під дією спрямованих пружних сил і, по-друге, виникнення масової фільтрації за рахунок «проштовхування» газу внаслідок циклічних деформацій в обсязі пласта, що виникають при хвильовому впливі

При зміні фази стиснення фазою розтягування в імпульсі пружної

хвилі за рахунок квазіперіодичного хвильового процесу відбувається розтягування насиченого пористого середовища. Перетин фільтраційних каналів зменшується, а тиск рідини у фазі розтягування збільшується. За наявності загального пластового градієнта тиску, спрямованого в область відбору рідини (в зону живлення свердловини), та градієнта капілярного тиску утворюються нерівноважні динамічні області: перед зоною стиснення зі зниженим тиском (за рахунок існування загального градієнта) та за цією зоною. Тилова зона характеризується підвищеним тиском та підвищеним фільтраційним опором через дію сил капілярної гістерези.

У зв'язку з цим обсяг газу ΔV , зайшов у область пласта у фазі стискування, проштовхується по пласту у фазі розтягування пружної хвилі у бік менших тисків і менших фільтраційних опорів, тобто. у зону відбору. Перший ефект пов'язаний із наявністю загального градієнта тиску, другий ефект визначається існуванням капілярної гістерези тиску. Загальна порція флюїду, прокачана в напрямку свердловини, що видобуває, складе за один період [76]:

$$2\Delta V = [(V + \Delta V) - (V - \Delta)]. \quad (2.15)$$

В результаті проведених досліджень [45] було показано, що в полі пружних коливань виникає низка специфічних ефектів. Зокрема, навколо нафтової краплинної фази з'являються гідродинамічні мікротечі, що супроводжуються появою сил взаємного тяжіння Бйоркнесса, що призводять до злиття крапель та утворення кластерів. У той же час рух нафтової фази в капілярному каналі виникає тільки після подолання капілярних сил. При накладенні пружного поля у фазі стиснутої пружної хвилі рух нафтової фази відповідатиме режиму просочення, який характеризується збігом напрямків градієнтів коливального та капілярного тисків. У фазі розтягування градієнт коливального тиску буде протилежний напрямку градієнту капілярного тиску, рух нафтової фази відповідатиме режиму дренажування.

Інший важливий ефект, викликаний накладенням хвильового поля, пов'язаний з дегазацією розчиненого в пластових рідинах, абсорбованого в

порах скелета газу. Це призводить до збільшення об'ємної газонасиченості пласта та зміни фазових проникностей нафти та води. При цьому рухливість води завжди зменшується, а рухливість нафти помітно збільшується за умов великої обводненості. У цьому відбувається збільшення припливу нафти, і кінцевої нафтовіддачі.

Зазначені ефекти дозволяють говорити, що збільшення реальної нафтовіддачі пласта то, можливо отримано з допомогою інтегрування їх у багатофакторні технології при одночасному хвильовому збудженні великих обсягів (великий площі) продуктивного пласта. Вирішення цього завдання за допомогою існуючих технологій вкрай важко, оскільки переважна більшість з них орієнтована лише на покращення ФЕС привибійної зони.

У зв'язку з цим у магістерської роботи розглядаються питання теоретичного обґрунтування та практичної реалізації системи великооб'ємного хвильового впливу на продуктивні пласти. В основу цих розробок покладено інтерференційну теорію хвильових полів. Це, зокрема, пов'язано з вирішенням проблеми турбулізації потоку в пластах, яка, як відомо, завжди означає підвищення притоку, що пов'язано зі зниженням фільтраційних опорів, залучення до струминного перебігу застійних та прикордонних зон пласта та ін. Вирішення цієї проблеми розглядається в магістерської роботи шляхом використання низки хвильових явищ, що у пласті при збудженні у ньому поля пружних хвиль.

Одне пов'язано з утворенням у пласті стоячих хвиль, умови виникнення яких визначено формулою $L = (2n - 1) \lambda / 4$. На рисунку 2.5 зліва показані промені 3 та фронти 4 стоячих хвиль. При інтерференції прямої та зустрічної хвиль утворюються області пучності 6, вузли 5 та вузлові лінії 7. У зоні пучностей амплітуда зміщення максимальна, а деформація дорівнює нулю. Як видно зі схеми, у пласті з його простягання утворюється ряд через вузлових поверхонь з максимальними деформаціями (напругами). Це призводить до виникнення у пласті мікроградієнтів тиску, що забезпечують рух флюїду у зону відбору свердловини на тлі загального пластового

градієнта тиску. Оскільки пласт є консервативною динамічною системою, утвореною енергетично замкнутими ділянками розмірами, рівними чверті довжини хвилі, стаціонарний хвильовий процес є слабким, і при повторному імпульсі хвильового впливу енергія його відновлюється.

В силу нерівноважного і неоднорідного динамічного стану пласта виникнення в ньому при хвильовому впливі областей складного напружено-деформованого стану, що чергуються, призводить до турбулізації, підвищення повноти фільтрації пластової рідини.

Друге технічне рішення, що розглядається в магістерській роботі, пов'язане зі створенням умов для збудження та розповсюдження у пласті поздовжніх та поперечних головних хвиль (балістичних хвиль, хвиль Мінтропу).

На рисунку 2.6 наведено променеву схему виникнення цих хвиль при розташуванні джерела вище і нижче пласта.

Ці хвилі виникають і розповсюджуються по межах пласта в тому випадку, коли хвиля, що збуджується джерелом, падає на кордон під кутом повного внутрішнього відбиття:

$$\sin \alpha = - \text{ для поздовжньої головної хвилі; } Vp_2 \quad (2.16)$$

$$\sin B = \text{ для поперечної хвилі} \quad (2.17)$$

де α та β – кути падіння хвиль на кордон;

Vp_1, Vp_2, Vsi – швидкості; p і s - хвилі в середовищах 1 та 2.

Необхідність використання цього технологічного прийому пов'язана з тим, що при русі пластового флюїду поблизу меж пласта вектор сили гідравлічного опору може врівноважити вектор пластового тиску, внаслідок чого рух флюїду або уповільнюється, або припиняється, або набуває навіть протилежного знака (зворотний перебіг). У цьому випадку періодично збуджуваний у пласті імпульс головної хвилі Д Р сприяє подоланню прикордонних сил та залученню в процес фільтрації пластової рідини в застійних зонах. При цьому особливе значення має утворення поперечної головної хвилі, що створює деформацію зсуву на стінках капілярів та берегах тріщин, що знищують сили адгезії.

Застосування при хвильовому впливі технологічного прийому, пов'язаного з збудженням головних хвиль, забезпечує підвищення ефективності

впливу на дальні зони пласта, оскільки хвилі, що ковзають уздовж кордону, виникають вже далеко за привибійною зоною і поширюються на великі відстані.

Підвищення енергоємності хвильового впливу пов'язане з реалізацією якості самофокусування у пласті енергії хвильового впливу [11]. Цей ефект виникає за умов нелінійності акустичних властивостей пласта. Зокрема, прикордонні зони пласта зазнають впливу кордонів розділу з вище- і нижче відкладеннями, і їх акустична жорсткість вище цього показника в центральній зоні пласта. Це дає можливість розрахунку місцезнаходження хвильового джерела таким чином, щоб забезпечити ефективне фокусування енергії у пласті.

Властивості самофокусування енергії складними колекторами з високим ступенем розчленованості використовувалися також у магістерській роботі розробки технології об'ємного хвильового впливу на метаноугольні пласти. Це тим більше важливо, оскільки технологія об'ємного хвильового впливу, що розробляється в магістерській роботі, дозволяє здійснювати інтегральне, сумарне збудження всієї продуктивної товщі, забезпечуючи, зокрема, перетікання з блокованих зон і вертикальну фільтрацію пластової рідини з погано проникних в добре дреновані пропластки, підвищуючи тим самим рівень видобутих запасів. Схема об'ємного хвильового впливу на тонкошарчасті товщі наведено на Технологія ОХВ має широкі функціональні можливості, т.к. відомі методи, пов'язані з локальним впливом на привибійну зону, не забезпечують збудження тонких шарів і прошарків, потужність яких найчастіше на порядок менше лінійного розміру випромінюючого елемента хвильового джерела.

2.3. Технологія об'ємного хвильового впливу на продуктивні пласти

Розробка родовищ з важковивантажуваними запасами вимагає раціонального підходу до вибору технологій доодержання вуглеводнів. Системний підхід до інтенсифікації роботи пласта в умовах падіння видобутку базується на підтримці та відновленні його пружної енергії.

Виявлено, більшість методів інтенсифікації припливу продуктивних пластів пов'язані з впливом на ПЗП з відновлення її фільтраційних характеристик

[29, 44]. Однак, зона прояву ефектів від використання існуючих методів – перші сантиметри від стінок свердловини [29]. Це унеможлиблює вирішення принципово важливої задачі - залучення в розробку тупикових зон пласта, блокованих ділянок защемлених вуглеводнів та ін.

В цьому випадку було б доцільно здійснювати вплив на значну площу пласта для збудження робіт останнього шляхом відновлення його пружної енергії.

З метою вирішення проблеми підтримки енергетичного балансу у пласті пропонується інноваційна розробка – технологія об'ємного хвильового впливу. Технологія є єдиною промисловою технологією, що забезпечує прояв майданного ефекту і, як наслідок, збудження далеких зон пласта (в радіусі до 6 км) [1].

Технологія об'ємного хвильового впливу характеризується такими технологічними параметрами:

- радіус зони охоплення впливом становить 2,0...2,5 км, в окремих випадках спостерігаються відгуки у свердловинах у вигляді збільшення їхньої продуктивності на відстані до 6 км від ініціюючої свердловини;

- мінімальна тривалість прояву ефекту хвильового впливу (по 12-ти родовищам) становить 6 місяців і в ряді випадків значно перевищує цю цифру;

- технологія має абсолютну екологічну чистоту;

- вплив здійснюється в галузі пружних деформацій, що виключає порушення цілісності колон, цементного каменю та породи колектора за колоною.

Сутність технології, заснованої на реалізації об'ємної інтерференції хвилі, полягає у тривалому циклічному збудженні пружних хвиль низького та інфразвукового діапазонів (5...15 Гц) безпосередньо у великих обсягах пласта.

Порушення хвильового поля здійснюється за допомогою спеціального джерела пружних хвиль, що опускається в свердловину на каротажному кабелі, що встановлюється в зоні продуктивного пласта (2.8).

При ОХВ фронт поля пружних хвиль падає зверху одночасно на всю площу пласта, що визначається радіусом першої зони Френеля. При цьому далека та ближня зони пласта збуджуються одночасно хвилею однакової потужності. Це сприяє виникненню перетоків, дифузії та ін між основною площею пласта і тупиковими, блокованими зонами з заземленими УВ, що забезпечує їх інтенсифікацію і залучення в розробку залишкових запасів.

У свердловину 2 на геофізичному кабелі 11з допомогою каротажного підйомника через напрямний ролик 8 опускається хвилевий свердловинний джерело 3. При збудженні джерела 3 в обсязі гірських порід, що перекривають продуктивний пласт 1, виникає і поширюється пружна хвиля фронтом 4. При падінні хвилі на пласт утворюються - Зони Френеля першого порядку 5 та старших порядків 6 [14].

Основна енергія впливу формується в області пласта, що відповідає 1-ій зоні Френеля, діаметр R_f якої дорівнює:

$$R_f = (2\lambda \cdot S)^{0,5}, \quad (2.18)$$

де λ - довжина хвилі; S – відстань від пласта до джерела.

Енергія, створювана у старших зонах Френеля, для цих умов істотного

значення немає [23].

Глибина установки хвильового джерела в свердловині розраховується виходячи з того вимоги, щоб область максимальної енергії хвильового впливу, що дорівнює першій зоні Френеля, перекривала область відбору пластового флюїду, що забезпечує максимальне та синхронне ініціювання всього об'єму пласта в цій зоні.

Для реалізації цієї вимоги глибина встановлення хвильового джерела у свердловині розраховується на основі співвідношення:

$$H_B = H_{\Pi} - R^2 \cdot \Phi / (2\lambda \cdot K),$$

$$K = R_{\Phi} / R,$$

де H_B - глибина встановлення хвильового джерела у свердловині;

H_{Π} – глибина пласта;

R_{Φ} , - радіус I-ої зони Френеля;

R – радіус області відбору;

λ - Довжина хвилі;

K – коефіцієнт перекриття.

При розрахунку глибини підвіски в свердловині хвильового джерела використовуються дані про розмір (радіусі R) області відбору.

Коефіцієнт перекриття k визначається залежно від схеми розробки, гірничо-геологічних умов та ін. У загальному випадку $K = 1$, що забезпечує повне перекриття зоною Френеля області відбору пластового продукту. При $k < 1$ зона Френеля частково закриває область відбору, що призводить до збільшення потоку енергії через область пласта:

$$P = M/S, \quad (2.21)$$

де P - густина потоку енергії в пласті;

M – потужність випромінювача;

S – площа хвильового опромінення пласта.

Розмір коефіцієнта перекриття визначає радіус зони найбільш інтенсивної хвильової дії всередині області відбору.

У свою чергу, розмір 1-ої зони Френеля залежить від відстані між пластом

і джерелом (або від глибини підвіски джерела). При збільшенні (зменшенні) глибини підвіски S радіус 1-ої зони Френеля зменшується, а щільність потоку енергії через неї зростає.

Таким чином, хвильовий вплив, що здійснюється при різних глибинах установки свердловинного випромінювача, забезпечує найбільшу енергоємність ініціювання тієї чи іншої області пласта з розмірами, що регулюються. При цьому спочатку забезпечується перекриття першою зоною Френеля усієї області відбору свердловини. Потім, у міру поглиблення джерела, зона найбільш інтенсивного впливу (зона максимальної щільності потоку хвильової енергії) як би стягується до свердловини до мінімального радіусу, що відповідає радіусу привибійної зони (10...20 м).

У першому випадку забезпечується збудження всього обсягу пласта у зоні відбору. Потім збуджуються області, що послідовно зменшуються, всередині зони відбору аж до привибійної зони. В останньому випадку може бути забезпечена найбільш інтенсивна дія з метою очищення привибійної зони від кольматантів (бурового розчину, асфальтосмолопарафіністих відкладень тощо).

З метою збільшення інтенсивності збудження пласта хвильовий вплив у кожній точці (на кожній стоянці хвильового джерела) здійснюється шляхом багаторазового збудження одиночних пружних імпульсів, кількість яких становить у середньому дві-три тисячі (до 6 тисяч). Інтервали між збудженням окремих імпульсів з урахуванням часу релаксації пружних напруг становлять 20...25 секунд.

У цьому випадку накопичена в пласті пружна енергія за час дії на кожній глибині складатиме:

$$\Sigma E = \sum^{N/K} = 1 A_k^2, \text{ или } \Sigma E = \int_0^t A_k dt,$$

де ΣE - накопичена хвильова енергія;

A_k - Енергія одиничного впливу (в одному імпульсі);

N – число імпульсів (2-10³... 6-10³);

t - загальна (сумарна) тривалість впливу в кожній точці.

Основних результатів застосування хвильової технології досягнуто при

інтенсифікації припливу нафтових пластів. Хвильова дія на газових родовищах вперше у світовій практиці була проведена на Коломацькому НГКР.

Значна термодинамічна ентропія ПЗП є причиною виникнення стрибків насиченості, нерівноважних станів капілярних сил на контактах різнонасичених зон, виникнення термічних стрибків, а також фізико-механічних неоднорідностей, у т.ч. кільцевих зон ущільнення та розущільнення гірських порід, що знаходяться у складнонапруженому стані.

Розробка технологій, що забезпечують вплив на далекі зони пласта, де зазвичай зосереджені значні залишкові запаси вуглеводнів у тупикових, блокованих ділянках, вимагає розгляду гідро- та газодинамічних особливостей цих зон.

Висновки за розділом 2

1. В результаті проведеного теоретичного та прикладного аналізу встановлено необхідність розгляду хвильових явищ у значних обсягах геосередовища, що включає продуктивний пласт та хвильові процеси в його привибійній зоні. Розроблювані в магістерській роботі принципи об'ємного хвильового впливу визначають застосування методів узагальненого аналізу хвильових полів, що збуджуються в нижньому напівпросторі, на основі класичної теорії поля.

2. Виявлено, що відповідно до зверненої формули Остроградського інтеграл, взятий на поверхні спостережень, перетворюється на інтеграл за обсягом, обмеженим цією поверхнею. Це дозволяє визначити потужність процесу у внутрішніх точках середовища (пласту).

3. Виявлено, що застосування формули Стокса дозволяє встановити потік вихору векторного поля через циркуляцію цього поля. Це дозволяє визначити характером поля вид течії - потенційне чи вихрове. Найбільша робота поля відбувається при найбільших значеннях потоку вихору поля.

4. У загальному вигляді векторний аналіз пружних полів при ОХВ дає критерії оцінки результатів та оптимізації впливу та дозволяє визначити області стоку, витоку, відсутність збурень, а також дає можливість виявлення в області перебігу замкнутих областей (зокрема блокованих зон).

5. Досліджено також характер та особливості хвильових процесів у неоднорідних шаруватих середовищах. Розглянуто випадки хвилеводної та модальної теорій поширення пружних хвиль у таких середовищах. Показано, що в умовах тонкошарових середовищ вплив на окремі пласти неможливий. У умовах найефективнішим є застосування запропонованої у магістерській роботі інтегральної технології об'ємного хвильового на шарувату товщу загалом.

6. Проаналізовано умови утворення стоячих хвиль та їх особливу роль у збудженні пластів. Це з утворенням особливих областей - вузлів стоячих хвиль, викликають пульсуючі деформації гірської породи навколо цих точок і поршневий ефект у пласті.

3. ОСОБЛИВОСТІ ТЕХНОЛОГІЇ ОБ'ЄМНОГО ХВИЛЬНОГО ВПЛИВУ НА ПРОДУКТИВНІ ПЛАСТИ

3.1. Хвильові ефекти в обсязі нафтових пластів

Роботи з дослідження фільтраційних потоків у продуктивних нафтових пластах, результати яких найбільш близькі до завдань розробки об'ємної технології, наведені в роботі [47].

При впливі пружними коливаннями на нафтові та газові пласти по насичувальному середовищу та скелету поширюються дві поздовжні (переупаковки та тиску) та одна поперечна (зсувна) хвилі. Поздовжня хвиля переупаковки згасає поблизу джерела коливань і, з погляду на пласт, не становить інтересу. Під дією іншої поздовжньої хвилі - хвилі тиску, яка поширюється на великі відстані, що насичують фази, що відрізняються один від одного за щільністю, за рахунок прояву інерційних властивостей здійснюють несинфазні коливальні рухи щодо своїх центрів і один одного.

Високочастотні об'ємні пульсації супроводжуються гідродинамічними мікротечіями навколо диспергованих фаз і знесенням дифузійних підшарів навколо них. Наслідком цього є розпушення та утончення поверхневих абсорбційних шарів навколо фаз. Мабуть, ці явища спричиняють зниження по (по непрямих оцінках, на кілька порядків) міжфазного натягу і кутів змочування диспергової вуглеводневої фази в гідрофільних колекторах в полі пружних коливань.

Крім розглянутого коливального переміщення фаз щодо своїх центрів та один одного в низькочастотному полі кожна з них здійснює високочастотні об'ємні пульсації, зумовлені внутрішньопоровою генерацією високочастотних коливань [45]. Джерелами цих коливань є мікронеоднорідності пористого середовища, а також поверхні поділу фаз. Найбільше це питання вивчено умов генерації капілярних хвиль, що виникають на «нерізких» межах розділу фаз.

Енергія пружних коливань частково втрачається на незворотні процеси, пов'язані з проявами об'ємної та зсувної в'язкості насичувального середовища,

генерацію високочастотних хвиль на межах розділу фаз, а також на нерівноважний теплообмін, що відбувається на відстані довжини хвилі між фазами стиснення і фаз.

При контакті, наприклад, краплі нафти поздовжнього коливального руху щодо навколишньої води в останній виникають сили тертя, обумовлені поперечними коливаннями, швидкість яких перпендикулярна напрямку поздовжньої хвилі. В результаті цього коливальна енергія рідини безперервно перетворюється на теплову, і поверхні розділу фаз нагріваються.

Виходячи з цього локальна температура у водяному шарі кінцевої товщини між поверхнями краплі і порового каналу визначається рішенням завдання теплопровідності з нерівномірно розподіленим об'ємним джерелом тепла [45].

На основі рішення цього рівняння можуть бути отримані локальні температури, що розвиваються на поверхнях контактів нафти у воді, залежно від амплітуди зміщення скелета пласта. Локальні температури на поверхнях розділу фаз можуть бути дуже суттєвими і надавати у зв'язку з цим серйозний вплив на зменшення кута змочуваності та сил міжфазного натягу.

У процесі хвильового впливу газ, що виділився внаслідок дегазації з нафти і води, фільтрується вгору по пласту через зону пружних коливань, тут диспергується і захоплює краплі і конгломерати нафти, що знаходяться у вільному стані. Далі під дією гравітаційних та спрямованих акустичних сил відбувається флотація частинок нафти у верхню (покрівельну) частину.

Крім зазначених вище явищ, пов'язаних з флотацією нафтових крапель та їх рухом у полі пружних коливань, дегазація нафтового пласта змінює відносні фазові проникності для нафти та води таким чином, що в обводненому пласті відносні фазові проникності для нафти збільшуються, а для води - зменшуються, цьому дія пружних коливань еквівалентна підвищенню тиску насичення або зниження розчинності газу [61].

Оскільки рідина в пористому середовищі знаходиться в замкнутому об'ємі, газ виділяється лише при закінченні відповідної частини рідини, на що потрібен кінцевий час. Тому в перший момент після ОХВ відбувається виділення

газу, а збільшення тиску по всьому пласту.

При цьому газ, що виділяється, займає звільнений поровий простір (аналогічно режиму розчиненого газу). Дегазація у пласті спостерігається, коли локальне чи повсюдне тиск у ньому стає рівним чи менше, ніж тиск насичення.

При хвильовому вплив рухливість води завжди зменшується у зв'язку з виділенням вільного газу в пласті, а збільшення рухливості нафти відбувається при високій обводненості.

3.2. Хвильові ефекти в обсязі газових пластів

Наявність газоконденсатного пласта як об'єкт для збудження ставить перед розробниками та виконавцями низку технічних і технологічних завдань. Справа в тому, що, по-перше, абсолютна більшість методів впливу застосовується до нафтових родовищ. Щодо інтенсифікації та розробки родовищ газу у світовій практиці газовидобутку є лише поодинокі спроби вирішення цього завдання [35]. І, по-друге, переважна більшість методів інтенсифікації продуктивних пластів має два суттєві обмеження, що впливають одне з іншого: проводиться вплив тільки в області ВЧ- та НВЧ-коливачь і здійснюється лише на обмежену область привибійної зони пласта швидкого згасання хвиль цього діапазону. Це призводить до того, що процеси впливу не захоплюють віддалені зони продуктивних нафто-і газоконденсатних пластів, де можуть бути зосереджені значні зацмлені або блоковані залишкові запаси УВ-сировини.

З урахуванням викладеного протягом ряду років проводяться роботи із застосування хвильового впливу в діапазоні середніх (знижених) частот. За збереження достатньої потужності частот ВЧ-діапазону, що забезпечують декольматацию ПЗП, це дає можливість суттєво підвищити радіус зони хвильового впливу.

До технічних труднощів розробки такої технології належить необхідність виконання хвильового впливу високорозчленованих колекторах, за умов втрати пластового тиску, високої обводненості, низьких дебітів.

Питання впливу хвильового впливу на фільтраційні процеси в

продуктивному пласті, згідно з динамічною моделлю, що розробляється в магістерській роботі, розглядаються на основі двох підходів до аналізу цих явищ: інтегрального та диференціального.

При інтегральному підході розглядаються узагальнені, сумарні ефекти в пласті при його збудженні пружними хвилями, довжина яких можна порівняти з потужністю пласта або трохи перевищує її. При цьому технологія об'ємного хвильового впливу забезпечує збудження пласта на великих ділянках (блоках) родовища (оптимально – у контурі живлення свердловин, що видобувають).

Теоретичні основи цієї інтегральної об'ємної хвильової технології передбачають аналіз інтерференційних явищ у пласті, що виникають при поширенні каналових хвиль та утворенні стаціонарних (стоячих) хвиль.

Диференціальні технології хвильового впливу у випадку пов'язані з порушенням обмеженої області привибійної зони пласта високочастотними хвилями, створюють нелінійні ефекти кавітації, теплового розігріву та інших.

Розгляд хвильових ефектів у разі може бути найбільш продуктивно здійснено із залученням моделі насичених пористих середовищ. Останні можуть бути двох типів: середовище з досконалим зв'язком між скелетом і флюїдом, що насичує, і з недосконалим зв'язком між цими компонентами. У першому випадку жорсткий пористий скелет і порозаповнювач здійснюють під дією пружних хвиль коливання у фазі, а в другому випадку коливання фази, що насичує, відстають по фазі від породи, аж до протифазних коливань.

Відповідно до цього хвильові рівняння, що описують коливальні процеси в свердловинних зонах, мають два рішення, що відповідають двом типам хвиль - низькочастотної та високочастотної. Хвиля першого типу є хвилею тиску, хвиля другого типу - хвилею перепакування частинок. Завданням є розробка технологій, що забезпечують створення у ближній зоні інтенсивної стійкої хвилі першого роду.

Доцільність такого підходу обґрунтовується тим, що характер фільтрації компонентів пластового флюїду через пористе середовище має цілу низку особливостей. Зокрема, встановлено обмеження умов застосування рівнянь Дарсі, що використовуються повною мірою лише для середовищ із звичайними

схемами руху.

У той же час на нафтогазоконденсатних родовищах виділяється значна частина теригенних і особливо карбонатних порід, що відрізняються підвищеним вмістом залишкової води. Остання може перебувати у вигляді бульбашок на стінках капілярних каналів і перешкоджати фільтрації, утворюючи водні бар'єри компонентам, що фільтруються. В результаті створюється початковий градієнт тиску, який істотно впливає на процеси розробки [61].

У породах із залишковою водою характерна фільтрація газу із граничним початковим градієнтом тиску. При цьому фільтрація здійснюється за умови, що градієнт тиску перевищує граничне значення.

Наявність у розрізі газових покладів гірських порід із початковим градієнтом тиску, тобто. газонасичених порід із високим вмістом води, що утримується за рахунок капілярних сил, змінює механізм фільтрації. У відсутності руху газу газова фаза не є гідродинамічно пов'язаною, оскільки порові канали перекриті водяними бар'єрами, і газ перебуває в дисипірованому стані. До досягнення граничного значення перепаду тиску рух газу через пористе середовище немає.

При перепаді тиску, що дорівнює граничному (початковому), частини водних бар'єрів, представлених рихло пов'язаною водою, деформуються і відкривають частину порових каналів для фільтрації. Деформація водних бар'єрів може здійснюватися за рахунок пружних хвиль, що періодично змінюють капілярні сили внаслідок пружності зацемлених у порах бульбашок газу. Таким чином, початковий градієнт тиску визначається ступенем деформації при хвильовому впливі бульбашок газу.

Існування невеликих бульбашок на поверхні між твердою підкладкою породи та водою у капілярах відзначається останнім часом у низці досліджень.

Крім того, істотне значення для утворення початкових градієнтів тиску мають дисперсні системи «краплинна нафта – вода» та «газові бульбашки – вода». Кожна крапля оточена бронюючою оболонкою, яка перешкоджає коагуляції крапель води. Руйнування емульсійних та дисперсних водогазових систем потребує суттєвих енергетичних витрат, що у практичних умовах

розробки родовищ вкрай важко. Це завдання може бути вирішена при хвильовому впливі, в процесі якого при поширенні хвиль тиску навколо крапель утворюються вихрові мікротечі, що зривають оболонку, що бронює. При цьому між краплями виникають так звані сили Бьоркнесса [86], що викликають взаємне тяжіння та коагуляцію крапель води. Внаслідок цього бульбашки самоорганізуються в кластери і не застряють (защемляються) у порах,

Наявність факту існування граничного (початкового) градієнта тиску та можливість його зміни за рахунок пружних сил хвильового впливу мають дуже важливе значення при розробці газоконденсатних родовищ. Зокрема, при припиненні відбору газу з пласта, що знаходиться при початковому пластовому тиску, відновиться тиск не до пластового, а до більш низького тиску, т.к. в околиці свердловини розподіл тиску відповідає досягненню граничного градієнта. Коли поблизу свердловини встановлюється тиск, що відповідає фільтрації з початковим градієнтом, приплив свердловину практично припиняється. Внаслідок цього кожна свердловина дренує лише частину пласта, радіус якої тим менше, що більше початковий градієнт тиску. Більш того, при русі з початковим градієнтом тиску можливе утворення усередині пласта нерухомих, застійних зон та ціликів. Порушення їх у віддаленій зоні пласта можливе лише при дистанційному об'ємному хвильовому впливі за технологією, що розробляється в магістерській роботі.

Тонкошаристість і неоднорідність пластів, поряд зі складністю розробки, відкривають нові можливості для застосування об'ємної хвильової технології збудження складнобудованих родовищ.

Наявність порід з початковим градієнтом тиску в тонкошаровому розрізі газових покладів істотно впливає на розподіл тиску в поклади, ступінь відпрацювання запасів газу, а також на закономірності обводнення. Зокрема, виникають перетікання газу через непроникний до початку розробки прошарок-розділювач у нижній частині одного з продуктивних горизонтів, що складається з кількох пачок газонасичених порід. Це означає, що після досягнення певної різниці тисків долається граничний градієнт для пласта-розделителя і через нього починається перетік газу з пласта, що не розробляється, в розробляється.

За рахунок різниці початкових градієнтів тиску для води та для газу (їх співвідношення дорівнює співвідношенню в'язкості води та газу) градієнтний пласт перетворюється на напівпроникну мембрану, яка пропускає вгору газ і не пропускає воду [61].

Якщо пласт з початковим градієнтом контактує з пластом, що розробляється без початкового градієнта, то в міру падіння в останньому пластового тиску в градієнтному пласті виникають значні різниці тисків поперек пласта. В результаті в пласт, що розробляється, надходить газ з градієнтного пласта по всій площі контакту між ними.

Імпульси тиску, що створюються на фронті хвиль, що збуджуються, накладаючись на загальний градієнт, пов'язаний з різницею тисків у двох середовищах, сприяють подоланню граничного градієнта, посилюють і багаторазово прискорюють процес просочування газу через кордон градієнтного і стаціонарного пластів, при цьому істотно розширюється зона дрен.

Зазначені особливості гідродинаміки шаруватих колекторів є основою для застосування технології хвильового впливу.

3.3. Інтерференційні системи хвильової дії на продуктивні пласти

Робота хвильового джерела в умовах неоднорідних гетерогенних шаруватих середовищ супроводжується утворенням та суперпозицією у цих середовищах хвильових полів різного походження. Причому характер хвильової дії принципово відрізняється в залежності від того, чи вплив локально впливає на привибійну зону пласта або інтегрально в обсязі деякої його області.

При хвильовому впливі важливе значення має така властивість анізотропії, як тріщинуватість гірських порід [43], яка, у свою чергу, характеризується розмірами L , розкритістю і перетином (шириною) тріщин зі зставленням з довжиною хвилі, що збуджується в пласті λ . Практичний інтерес становлять випадки резонансного дифракційного впливу при $L=\lambda$. Цей тип хвильового поля характеризується значним розсіюванням енергії пружних хвиль. Зокрема, щодо динаміки відкритих тріщин, утворених гідророзривом,

встановлено, що навіть за малої ширині тріщин вони сильно впливають дисперсію поздовжніх хвиль. Ці особливості хвильових полів будуть використані в розділі 4 під час розгляду технології хвильового супроводу гідророзриву пласта.

Для об'ємного хвильового впливу на продуктивні пласти або шаруваті товщі принципове значення має розгляд інтерференційних явищ, зокрема утворення інтерференційних смуг у формі кілець кількостей максимальної і мінімальної (нульової) інтенсивностей коливань. Такі елементи дифракційної хвильової картини, наведеної рисунку 3.1, є зони Френеля [23], мають ширину, рівну половині довжини хвилі.

Амплітуди коливань зменшуються зі зростанням номера зони, а дія хвилі (сума дії всіх зон Френеля) еквівалентна дії першої, найбільш енергоємної, зони. Радіус цієї зони визначається із формули:

$$R = (\lambda \cdot H)^{0,5}, \quad (2.23)$$

де R - радіус 1-ої зони Френеля;

λ - довжина хвилі;

H - відстань до поверхні дифракції.

Інтерференційний характер поля пружних хвиль, збуджуваних при хвильовому впливі, визначається, насамперед, тріщинуватістю гірських порід. При цьому дуже важливою властивістю тріщинуватих порід-колекторів є те, що ансамбль тріщин утворює дуже специфічну акустичну неоднорідність, що розсіює [44]. Пружна хвиля, що падає при хвильовому впливі на таку неоднорідність, породжує вимушені коливання, що супроводжуються утворенням у пласті розсіяної хвилі. На підставі принципу Гюйгенса, розсіяна хвиля утворюється на сукупності (ансамблі) неоднорідностей (тріщинуватості) в одиничному обсязі, що має форму диска завтовшки $0,5 \lambda$ та діаметром $(2\lambda \cdot H)^{0,5}$, рівним розміру 1-ої зони Френеля.

Енергія розсіяної хвилі $E_{рв}$, сформованої в одиничному обсязі тріщинуватого колектора, визначається з виразу [44]:

$$(2.24)$$

де W - Щільність потоку потужності пружної хвилі; n - Число тріщин в одиниці об'єму пласта; G - характеристика потужності хвильового випромінювання; σ_n - характеристики розсіювання та анізотропії.

Енергія розсіяної в пласті хвилі лінійно залежить від параметрів тріщинуватості і, насамперед, визначається їх хвильовим опором де ρ - щільність середовища, v - швидкість пружної хвилі. Виходячи із співвідношення рідини та породи, можна сказати, що найбільш енергоємним є процес збудження нафтового пласта по відношенню до газового.

У той самий час, під час розрахунку систем хвильового впливу слід пам'ятати, що потужність одиначної розсіяної хвилі при ОХВ на пласт мала і може викликати істотного зміни фільтраційних процесів. У зв'язку з цим підвищення загальної потужності ОХВ забезпечується за рахунок накопичення енергії хвиль у пласті шляхом багаторазового хвильового впливу [(10...12) тис. одиничних впливів].

Висновки за розділом 3

Аналіз взаємодії хвильового поля, що збуджується при об'ємному хвильовому впливі, з продуктивними пластами показує, що процеси хвильового збудження нафтових та газових пластів мають суттєві відмінності.

1. При збудженні нафтових пластів основне значення мають ефекти гравітаційної сегрегації пластової рідини на нафтову та водну фази та процеси дегазації пластової води, нафти та скелета. Це призводить до зміни рухливості нафти та води, а також переформування потоків у пласті [40, 42].

2. При збудженні газоконденсатних пластів необхідно враховувати здатність газової фази займати весь об'єм порового простору навіть за значного падіння пластового тиску, і навіть наявність градієнта початкового пластового (бар'єрного) тиску, подолання якого має бути розрахована потужність хвильового поля.

3. З розгляду хвильових явищ, що виникають при об'ємному збудженні пластів, випливає, що при розрахунку параметрів останнього - площі охоплення впливом, його інтенсивності та сумарної потужності на одиницю об'єму пласта

при накопиченні впливів необхідно використовувати метод Френеля.

Ці основні особливості повинні враховуватися розробки технології об'ємного хвильового впливу.

4. ТЕОРЕТИЧНЕ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ОБГРУНТУВАННЯ, ДОСВІД ПРАКТИЧНОГО ЗАСТОСУВАННЯ І РОЗРОБКА КОМПЛЕКСНИХ БАГАТОФАКТОРНИХ ХВИЛЬОВИИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Аналіз дуже численних методів впливу на продуктивні пласти, заснованих на різних механічних, фізичних та хімічних методах зміни властивостей і структури колекторів, підтверджує, що жоден з них не може забезпечити вирішення завдання кардинального підвищення ФЕС колектора через величезну різноманітність факторів, що діють у продуктивних пластах.

Систематизація цих факторів, а також аналіз взаємодії фізичних полів у гірських породах нафтогазових басейнів показують, що основний вплив на ефективність впливу надають механіко-динамічні та гідродинамічні процеси у продуктивних відкладах. Очевидно, що оптимізація процесів експлуатації та розробки родовищ може бути успішною на основі спільного застосування методів хвильової динаміки, механічних та фізико-хімічних методів [69].

Нижче розглядаються способи застосування хвильових технологій як універсальні методи супроводу основних технологічних процесів розробки родовищ нафти і газу на прикладі родовищ Яблунівського та Коломацького НГКР.

4.1. Досвід застосування технології об'ємного хвильового впливу на газоконденсатні пласти

Абсолютна більшість методів ініціювання процесів розробки відноситься до нафтових родовищ. Щодо інтенсифікації та розробки газу у світовій практиці газовидобутку є лише поодинокі спроби вирішення цього завдання. З огляду на це нами протягом ряду років проводяться роботи із застосування об'ємного хвильового впливу на газоконденсатні пласти [44].

На першому етапі (безпосередньо після закінчення хвильового впливу) відзначений інтенсивний приплив газової фази як найбільш рухомий компонент пластового флюїду. При цьому зміна дебітів носить стрибкоподібний характер з

інтенсивними викидами газу, що пов'язано з неоднорідними деформаціями різних ділянок складного колектора.

З другого краю етапі відзначається більш рівномірний приплив пластового флюїду, відповідний періоду динамічного рівноваги.

Крім того, відзначається наявність зони інтенсивної зміни геодинамічних деформацій, викликаних проведенням хвильовим впливом на пласт. Виникнення таких деформацій підтверджується наявністю інтенсивних сплесків у середньодобовому видобутку газу.

Ефективність об'ємного хвильового впливу можна оцінити по групі близько свердловин, що розташовані один до одного, так як воно характеризується виконанням робіт в об'ємі на пласт. Для проведення робіт з об'ємного хвильового впливу на газоконденсатні пласти було обрано три ділянки Яблунівського нафтогазоконденсатного родовища: зона УКПГ-2, УКПГ-3, УКПГ-14.

Роботи з хвильової дії на ділянці УКПГ-2 проводилися по зонах свердловин №№ 3070, 112, 2030 у три періоди:

- у період з 2 листопада по 5 листопада 2017 року хвильовий вплив проводився по зоні свердловини № 20 протягом 72 годин. Для операції було обрано першу групу свердловин №№ 106, 18, 107, 33, 110;

- у період з 8 листопада по 11 листопада 2017 року хвильовий вплив проводився по зоні свердловини № 112 протягом 72 годин. Хвильового впливу зазнали свердловини №№ 77, 116, 26, 135, 8;

Роботи з хвильової дії на ділянці УКПГ-3 проводились по зоні свердловини № 3032, на ділянці УКПГ-14 – по зонах свердловин №№ 33, 48.

У зоні свердловини №32 роботи проведено з 9 по 15 жовтня 2018 року. Тривалість дії склала 120 годин. Оцінка ефективності хвильового впливу здійснювалася у вигляді аналізу даних, отриманих щодо свердловин №№ 407, 6, 18, 16, 7, що у зоні передбачуваного прояви ефектів хвильового збудження пласта.

Перед початком робіт у вересні 2008 року проведено базові контрольні вимірювання. Після виконання робіт із хвильового впливу на цих свердловинах

проводилися поточні контрольні виміри в період з 29 жовтня до 5 грудня 2018 року.

Проведення контрольних вимірів пов'язане зі значними труднощами, оскільки контрольні свердловини є одиночними, а працюють у один шлейф з 3-5 (до 7-ми) іншими свердловинами.

Зведені показники роботи свердловин до та після хвильового впливу наведено у таблиці 4.4.

При розрахунку та аналізі результатів хвильової дії слід враховувати нерівномірність у часі процесу відгуку пласта на вплив. У межах зони охоплення утворюються дві концентричні області, кожна з яких має вміст газу і водонасиченість, які згодом вирівнюються. Процеси взаємодії у цих зонах розвиваються з різною швидкістю:

- швидкий процес - це процес утворення та розширення зони дегазації з витісненням у свердловину води та конденсату;
- повільний процес - витіснення газу із блокованих ділянок. Тому на першій стадії після дії відзначаються процеси, характерні для швидкої фази - виділення газу, винесення твердих частинок, нерівномірні притоки, турбулізація та ін.

Потім відзначаються область стабілізації та прояв процесів, характерних для повільної фази, із встановленням та розвитком процесів фільтрації газу з периферійних ділянок зони пласта.

За результатами проведених вимірів виявлено, що в зоні свердловини № 3032, що ініціює, дебіт свердловин №№ 407, 6, 18, 7, 16 у сумі збільшився на 21,7 тис. м³/добу. Результати проведення робіт на свердловині № 32

Найбільші труднощі робіт, виконаних у 2018 році за розробленою хвильовою технологією, пов'язані безпосередньо з проведенням хвильового впливу по зоні свердловини № 13, а також з дослідженнями свердловин, що реагують, зони впливу, а саме:

- з типом та конструкцією свердловини впливу. Вона є похило

спрямованою, zenітні кути змінюються від 10° до 26° , відхід становить понад 500 м. Це потребувало модернізації технології хвильового впливу відповідно до конкретних умов її застосування;

- з особливостями схеми шлейфів на ділянці, що збуджує родовища. Свердловини ділянки, встановлені як контрольні в зоні свердловини впливу № 33, працюють, як правило, в один шлейф спільно з іншими свердловинами, що добувають. У зв'язку з цим проведення вимірів кожної з цільових контролюючих свердловин вимагає зупинки інших свердловин шлейфу.

Зазначені особливості проведення хвильового впливу ділянки призвели до того, що початковий план виконання контрольних вимірів був змінений, і виміри були проведені тільки на свердловинах №№ 48, 49. При цьому дослідження мали різнотипний характер: базові вимірювання проведені з встановлення дослідження свердловин «Порта-Тест», а періодичні — на контрольному сепараторі. Незначний обсяг даних не дозволяє встановити закономірність у відгуку пласта. Це може бути пов'язано також з нестабільністю динамічного стану та роботи пласта у перехідний період після проведення хвильового впливу. Як показує досвід, цей процес може супроводжуватись тимчасовим перерозподілом фільтраційних потоків. Надалі це призводить до зростання дебіту свердловин.

Основний недолік робіт полягає в малих обсягах хвильового впливу, що проводиться, і у відсутності системного моніторингу зон охоплення таким впливом. Це знижує ефективність аналізу динаміки роботи пласта при хвильовому впливі, зокрема утруднює оцінку тривалості прояву ефекту хвильового впливу (часу післядії останнього).

Висновки

1. Результати проведення ОХВ на свердловині № 70 із збільшенням дебіту газу на 35,6 % свідчать про ефективність технології ОХВ на газоконденсатні пласти.

2. У зоні свердловини № 32 відзначаються стабілізація та зростання дебітів свердловин на ділянці впливу (збільшення дебітів газу у сумі на 12,25 %). Це дозволяє зробити висновок про успішність проведених робіт з технології

об'ємного хвильового впливу.

3. Отримані дані щодо зони свердловини № 33 не дозволяють дати однозначну оцінку результатів проведених робіт. З великим ступенем упевненості можна говорити про те, що пласт відреагував на хвильовий вплив, і в ньому розвивається динамічний нестационарний процес. Характер розвитку цього процесу може бути встановлений за короткий інтервал спостережень дуже обмеженому числі свердловин (2 свердловини). Очевидно, що реакція пласта на цій ділянці відрізняється від відгуку на хвильовий вплив у зоні свердловини № 32, що визначається, мабуть, специфікою гірничо-геологічних та гідродинамічних характеристик. Більше впевнені висновки може бути зроблено під час проведення подальших спостережень.

4. У контрольній свердловині № 48 отримано значний приріст дебітів газу (близько 37%).

На основі аналізу результатів проведених робіт можуть бути такі рекомендації:

1. Здійснювати відбір ділянок щодо хвильового впливу ґрунтовніше, зокрема, з урахуванням умов ефективного аналізу його результатів: щільніша сітка видобувних свердловин, схема шлейфів, що забезпечує незалежні виміри, наявність системи контролю тощо;

2. Значно збільшувати обсяг та тривалість моніторингу ділянок хвильового впливу;

3. Проводити збудження продуктивних пластів із застосуванням технології об'ємного хвильового впливу на всіх свердловинах, на яких проводитиметься капітальний ремонт свердловин з підйомом НКТ;

4. Значно збільшити обсяг дослідно-промислових робіт із метою вдосконалення технології об'ємного хвильового впливу.

4.2. Хвильовий супровід гідророзриву пласта

Розробка родовищ із важковилученими запасами або виснажених, що у заключній стадії експлуатації, вимагає проведення дуже серйозних геолого-

технологічних заходів для стабілізації відборів рідини чи навіть зниження темпів їх падіння. При цьому особливе значення мають технології, що забезпечують не просте збільшення фізичних обсягів продукції, а підвищення нафтогазовіддачі продуктивних пластів, що, своєю чергою, викликає зниження залишкових запасів УВ-сировини, що не вилучаються.

Серед методів інтенсифікації притоків нафти та газу виділяють дві групи:

- методи локального на пласт, головним чином, в одиничних видобувних і нагнітальних свердловинах;
- методи інтегрального, чи площадного, на продуктивні пласти загалом у межах блоку (ділянки) родовища.

При всьому різноманітті методів та технологій впливу на нафтові та газоконденсатні пласти вони вирішують поставлені завдання:

- підтримка або відновлення пластової пружної енергії, що витрачається в міру розробки родовища;
- відновлення або навіть покращення природних фільтраційно-ємнісних властивостей колектора, змінених у силу геолого-фізичних або техногенних (під час експлуатації) причин;
- Збільшення продуктивності пласта.

Серед методів, що забезпечують досягнення цих цілей, важливе місце займає об'ємна низькочастотна хвильова технологія, що працює в імпульсному режимі багаторазового пружного збудження пласта. Цим дана технологія відрізняється від інших технічних рішень, що забезпечують квазістаціонарний режим на пласт. Стаціонарний режим підтримки пластового тиску, наприклад, у системі ППД шляхом заводнення родовища замінюється імпульсним режимом багаторазової циклічної зміни тиску при проходженні фронтів пружних хвиль. Мікроградієнти тиску при інтегруванні в часі і за площею ділянки родовища створюють безперервно змінюється векторне гідродинамічне поле, в якому інтенсифікуються фільтраційні процеси.

Вплив на фільтраційно-ємнісні властивості колектора у хвильовій технології здійснюється також в імпульсному режимі шляхом пульсуючого зміни перерізу порових каналів у фазі розтягування пружної поздовжньої хвилі

та інтегрування цих змін при багаторазовому хвильовому впливі.

Дія в низькочастотному діапазоні ініціює в пласті процеси, що повільно протікають, пов'язані з масопереносом у вертикальній і горизонтальній площинах. До таких процесів відносяться гравітаційна сегрегація пластового флюїду по компонентам «нафта» і «вода», фазові проникності пористого і пористо-тріщинуватого колекторів, прямоточне і протиточне просочення колектора, струменеве протягом (освіта кластерів). Ці процеси, крім гравітаційних, пов'язані, перш за все, з виникненням мікроперепадів тиску на фронті низькочастотної хвилі та створенням за рахунок інтегрування цих процесів більш менш стійких зон фільтрації пластового флюїду. Крім того, ці процеси інтенсифікуються за рахунок напівперіодних збільшення обсягу порожнечі (насамперед тріщинуватості) колектора, що також сприяє руху флюїду в зоні відбору (живлення) свердловин, що видобувають, і вирівнюванню фронту витіснення нафти і газу водою. Накладення довгоперіодних коливань забезпечує посилення процесів масообміну між тріщинами і блоками матриці тріщинуватий і кавернозно-тріщинуватий колекторів.

Зазначена роль тріщинуватості колекторів у забезпеченні приток пластових флюїдів як рідких, так і газоподібних визначає необхідність проведення ГТМ у вигляді штучного заводнення, що виконується в циклічному та стаціонарному режимах, а також ГРП. Виконання цих заходів, і насамперед ГРП, супроводжується утворенням нової тріщинуватості чи перерозподілом існуючої (зокрема і реанімацією старої) тріщинуватості. Проте потенційно висока ефективність ГРП як поліпшення ФЕС продуктивного пласта реалізується недостатньо. Причинами цього є складність створення протяжних тріщин, недостатній ступінь їхнього розкриття та, що особливо негативно для технології ГРП, нетривалість життя, або швидке схлопування техногенних тріщин. Крім того,

Забруднення свердловини зони характеризується виникненням кільцевої області з деяким радіусом забруднення та погіршеним скін-ефектом.

Зниження продуктивності забруднених свердловин викликано додатковими опорами при фільтрації через зону.

Низька продуктивність низькопроникних пластів пояснюється загальними порівняно постійними опорами фільтрації по пласту, починаючи від віддаленої зони пласта аж до стінок свердловини.

При проведенні гідророзриву в пласті утворюються нові та розширюються існуючі тріщини, і картина ліній припливу пластового флюїду змінюється від плоскорадіальної до складної за збереження плоскорадіальної фільтрації поза створеної тріщини. Тріщини утворюються за рахунок створення на вибої свердловини високого тиску (тиску гідророзриву), що перевищує нормальну напругу гірських порід у зоні, що розривається. При цьому продуктивність нагнітання робочої рідини має перевищувати темп поглинання рідини у пласт (4.3).

У разі значної латеральної неоднорідності пласта інтенсифікація його можлива лише з урахуванням методів, які забезпечують вплив одночасно на значні ділянки родовища [49]. Тільки такий тип впливу, що реалізується, зокрема, в технології об'ємного хвильового впливу, здатний викликати перерозподіл пружних сил в областях напружено-деформованого стану гірських порід [8], в результаті якого за рахунок запасу потенційної пластової пружної енергії, що вивільняється, здійснюється інтенсифікація руху пластового флюїду в всій зоні відбору свердловини. У зв'язку з цим хвильовий вплив стосовно ГРП набуває особливого значення.

Особливість технології хвильового супроводу гідророзриву пласта полягає в умовах його проведення. Справа в тому, що знову утворені при ГРП зони техногенної тріщинуватості взаємодіють з вже існуючою (до ГРП) тріщинуватістю колектора і істотно впливають на її перерозподіл.

При проведенні гідророзриву в пласті утворюються головна (магістральна) тріщина та система дрібніших, що операють тріщин.

При об'ємному хвильовому впливі порушується природний напружено-деформований стан масиву гірських порід, що склався в процесі формування гірських порід та подальших динамічних (тектонічних) процесів. Динамічне навантаження при об'ємному хвильовому впливі веде до появи зусиль, що розтягують, що виникають внаслідок флуктуації напруг. Під їх впливом

утворюються по-різному орієнтовані мікротріщини [80]. Поверхня мікротріщин у перерізі утворює еліпс. Якщо його вісь паралельна або знаходиться під невеликим кутом до вектора головної напруги, то на кінцях осі наводяться зусилля, що розтягують (4.4).

Тому серед безлічі тріщин найбільш сприятливі умови для свого розвитку мають ті, які збігаються у напрямку з головними макроскопічними напругами. Ці напруги, що завжди існують у гірському масиві, можуть бути посилені при проведенні робіт з технології хвильового впливу в результаті створення багаторазових циклічних напруг. В результаті рівень наведених напруг, що сконцентрувалися на кінцях тріщин, починає перевершувати межу міцності породи, і відбувається розвиток («розпарювання») тріщин.

Незважаючи на незначне зростання тріщин у кожному окремому акті впливу, при тривалих динамічних навантаженнях диз'юнктивне порушення суцільності гірського середовища може простежуватися на значній відстані. Такий характер порушення хоч і спостерігається для магістральної тріщини, але особливо характерний для дрібніших тріщин, що операють, через які в основному йде фільтрація флюїду за схемою «операючі тріщини - магістральні тріщини - площина гідророзриву - свердловина».

Проведення ГРП сприяє турбулізації потоку за рахунок перерозподілу градієнтів тиску при гідророзриві, що завжди призводить до посилення фільтраційних процесів.

З енергетичної точки зору застосування технології об'ємного хвильового впливу, що супроводжує ГРП, можна розглядати як спосіб компенсації втрат пружної енергії пласта у процесі розробки родовища. Як показано в розділі 2, для поля швидкостей потоку в пласті умовою стоку є умова $\operatorname{div} f < 0$. Дивергенція поля швидкостей (вектор хвильового поля $U = \operatorname{grad} f + \operatorname{rot} \Phi$) накладається на поле фільтраційних потоків і визначається із співвідношення:

$$\operatorname{div} U = \operatorname{div} \operatorname{grad} f = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial z^2}$$

Оскільки $\operatorname{div} \operatorname{rot} \Phi = 0$, то в околиці хвильового джерела $\operatorname{div} U > 0$.

З цих співвідношень випливають дві важливі обставини. Насамперед, втрати пружної енергії пласта заповнюються енергією, що доставляється хвилею дилатації.

У той же час вихрова складова хвильового поля надзвичайно важлива для створення деформацій зсуву в обсязі пласта [70], що, в кінцевому рахунку, забезпечує зниження фільтраційних опорів за рахунок виникнення вектора обертання елементарних обсягів скелета.

Але в цьому випадку необхідно створити джерело додаткової енергії, що забезпечує виконання умови стоку $div U < 0$. Приклад розробки такого джерела дано в розділі 4. У цьому відношенні спільне застосування джерел хвильового поля різних типів (градієнтного і вихрового) або суміщеного джерела поздовжніх і поперечних хвиль дозволяє вирішувати проблему в комплексі: зниження втрат енергії при фільтрації потоку (вихрові сили) і витіснення флюїда – проштовхування за рахунок зміни елементарних обсягів речовин (консервативні сили). Потенційне поле, що з дією сил другого роду, забезпечує пряме підвищення енергоємності хвильового впливу. Вихрове поле дає опосередковане збільшення цього показника за рахунок зниження непродуктивних втрат енергії при фільтраційних процесах у пласті. Сукупна дія цих полів забезпечує компенсацію енергетичних втрат пласта в процесі розробки, що призводить, зрештою,

Існуючі комплексні технології «ГРП – хвильовий вплив» передбачають безпосередній вплив на ПЗП. Приклад такої технології, що поєднує Hydro Vibro frac (США) і високочастотний хвильовий вплив, наведено в роботі [29]. Недоліком хвильового супроводу цього способу гідророзриву є незначна за обсягом область порушення ПЗП високочастотним полем.

На відміну від відомих способів об'ємного хвильового супроводу гідророзриву, представлений в магістерській роботі, передбачає об'ємний хвильовий вплив на весь об'єм пласта (в обсязі 1-ої зони Френеля в радіусі в середньому від 3 до 6 км), що включає також область гідророзриву. При цьому схема хвильового впливу розраховується так, щоб перша зона Френеля збігалася з областю гідророзриву, що забезпечує оптимально енергетично її ініціювання (

4.5).

4.2.1. Результати промислового застосування технологій хвильового супроводу ГРП

Викладені принципи хвильового ініціювання пластів спільно з проведенням робіт з ГРП проводилися з нагнітальної свердловини № 17 (протягом 4 діб) з метою збільшення прийомистості даної свердловини та збільшення продуктивності оточуючих її видобувних свердловин, і з добувної свердловини № 8 (протягом 1 доби) з метою збільшення добувних можливостей цієї та оточуючих свердловин. Проводилася також оцінка результатів впливу за допомогою відстеження зміни робочих параметрів свердловин, що ініціюють, а також свердловин, що знаходяться в їх оточенні.

При аналізі роботи свердловини № 17 після проведення ГРП додатково оцінювалася робота навколишніх свердловин № 9, № 3, № 34,918. У таблиці 4.7 наведено результати об'ємного хвильового (майданного) впливу на свердловину нагнітальну № 17.

При аналізі роботи свердловини № 98 після проведення ГРП додатково оцінювалася робота навколишніх свердловин № 11 № 98.

У таблиці 4.8 наведено результати локального на добувну свердловину № 98. Висновок: оцінюючи результати проведення об'ємного хвильового впливу на дослідних свердловинах родовища можна говорити про наступне:

- внаслідок майданного впливу через нагнітальну свердловину № 17 спостерігається збільшення прийомистості на 40 м³/добу (ефект тривав 4 тижні); за деякими свердловинами, що знаходяться в оточенні (по свердловинах після ГРП різного періоду), спостерігається приріст видобутку нафти (в середньому 2,3 т/добу додаткової нафти на свердловину);

- внаслідок локального впливу на добувну свердловину № 98 спостерігається приріст видобутку нафти на 12 т/добу (+ 53%). З іншого боку, спостерігається реакція двох видобувних свердловин, у яких проводилися ГРП (середній приріст видобутку нафти - 2,5 т/добу на свердловину).

За результатами робіт пропонується подальше впровадження технології

об'ємного хвильового впливу. Основний напрямок - відновлення потенційних добових можливостей на свердловинах після ГРП, вироблених у різні періоди часу.

4.3. Комплексна технологія оптимізації газліфту

При експлуатації родовищ, що у заключній стадії розробки за умов падіння видобутку нафти і є, важливим є питання підтримки пластового тиску і відновлення пружної енергії пласта чи створення умов забезпечення ефективної розробки та стабілізації відбору вуглеводнів.

Найбільш поширеним способом розв'язання першого завдання є організація системи ППД (заводнення або водогазовий вплив). Для вирішення другого завдання останнім часом все більшого розвитку отримують також технології хвильового впливу у двох варіантах: поліпшення ФЕС зони відбору свердловини за рахунок впливу на ПЗП та підвищення умов фільтрації та коефіцієнта вилучення нафти (КІН) за рахунок залучення в розробку блокованих запасів та ін. за допомогою впливу на пласт або його блоки в цілому.

Одним із способів вирішення останнього завдання є технологія об'ємного хвильового впливу, що розробляється та запропонована в даній магістерській роботі. Розглядаються також питання комплексування технології ОХВ із механізованими методами експлуатації свердловин, зокрема з газліфтним способом [17, 47]. Актуальність цього завдання випливає, зокрема, з розгляду питань великої кількості досі невирішених проблем ефективної розробки газонафтових покладів із складними запасами.

Основні вимоги до розробки газонафтових покладів [61] полягають у наступному:

- збереження рівноваги у системі пластових рідин. Порушення цієї рівноваги призводить до ретроградної конденсації та зміщення нафтової облямівки в «сухі піски»;

- безперервне підтримання оптимального газового чинника (відносини витрати газу, що видобувається, до витрати дегазованої нафти).

Розробка газонафтового покладу ведеться на природному режимі і знаходиться на стадії падіння нафти з 2018 року [47, 84]. В результаті значно знизилася видобувні можливості свердловин (4.6, таблиця 4.9).

З покладу вилучено близько 24% початкових геологічних запасів нафти.

Пластовий тиск по свердловинах змінюється в діапазоні 8,7...19,2 МПа. Середньозважений пластовий тиск становив 13,0 МПа. У процесі розробки покладу пластовий тиск знизився з початкового 20,6 до 14,0 МПа, за перші два з половиною роки експлуатації – на 2,0 МПа (до 18,2 МПа), у період 1986 – 2011 р.р. - на 1,6 МПа, і з 2013 р. тиск знижується по 0,2...0,7 МПа на рік (4.7). Ступінь зниження пластового тиску від початкового становить 356%.

Такий темп зниження пластового тиску говорить про активізацію процесу виснаження пружної енергії газової шапки, що в умовах розробки покладу на природному режимі веде до більш інтенсивного падіння пластового тиску та необхідності застосування методів підтримки пластового тиску. Необхідно розуміти, що зниження тиску може призвести до сильного прояву режиму розчиненого газу. Необхідно так здійснювати експлуатацію нафтової облямівки, щоб зберегти рівновагу в системі свердловина - пласт для максимального вилучення запасів вуглеводнів.

Видобуток нафти здійснюється із застосуванням високонапірного газліфту та використанням як робочого агента сірчистого газу від свердловин-донорів, а також має місце фонтанний спосіб експлуатації. Як газліфтний газ (для видобутку нафти з покладу) передбачено використовувати газ високого тиску з газових свердловин Башкирського покладу [84].

На покладі ГКР свердловини працюють у режимі періодичного газліфту. Це означає, що якусь частину часу свердловина накопичує рідину на вибої та в НКТ, а потім газліфтом ця рідина викидається в систему збору, і свердловина знову зупиняється цикл повторюється. При цьому гирло свердловини завжди відкрито, і гирловий тиск практично завжди дорівнює тиску в системі збирання [84].

Для забезпечення умов сталої експлуатації нафтовидобувних свердловин можливий перехід на розробку покладу з ППД.

Також в умовах значної неоднорідності колекторських властивостей, що складають поклад відкладень (як за площею, так і розрізом), відзначається нерівномірне вироблення запасів нафти.

Для вирівнювання ступеня вироблення запасів нафти з продуктивних відкладів покладу необхідне застосування геолого-технічних заходів, вкладених у підвищення продуктивності свердловин у низькопродуктивних зонах.

Ці завдання можуть бути вирішені шляхом комплексування технології ОХВ зі стандартними методами експлуатації свердловин.

Спроба ефективної експлуатації покладу при розгляді таких особливостей газонафтових пластів здійснена в магістерській роботі на основі поєднання принципів об'ємного хвильового впливу та газліфтного способу. При цьому поєднуються енергія підйому рідини газліфтом і енергія газу, що розширюється, додатково надходить у свердловину з пласта при проведенні ОХВ. В останньому випадку попутно вирішуються також два інші завдання: збільшення припливу рідини і зниження обсягу агента, що закачується при газліфті.

Висловлені причини обґрунтовуються такими аргументами. Відомо [62], що в статичному стані тиск рідини на вибої свердловини дорівнює пластовому тиску:

$$P_{пл.} = H_{ст.} \cdot \rho \cdot g, \quad (2.26)$$

Де $P_{пл.}$ -пластовий тиск;

$H_{ст.}$ -статичний рівень рідини;

ρ -густина рідини;

g -прискорення сили тяжіння.

З перетвореної формули

$$H_{ст.} = P_{пл.}/(\rho \cdot g) \quad (2.27)$$

слід, що статичний рівень рідини в свердловині буде тим вищим, чим менше її щільність.

У свою чергу щільність пластової рідини залежить від вмісту в ній повітря або газу. Отже, чим більше буде введено газоподібного агента в повітряну трубу ліфтової системи і чим більше надійде газу із пласта, тим менше стане щільність газорідинної суміші в підйомній трубі [62]. Гідрогазодинамічна рівновага в

системі «свердловина - пласт» може бути досягнута як при зниженні об'ємів агента, що закачується, так і при підвищенні припливу газонасиченої пластової рідини в свердловину. Вочевидь, друге переважно, т.к. зазначена рівновага досягається паралельно зі збільшенням обсягу видобутку.

Реалізація такого підходу потребує певних змін у способах розрахунку режимів газоповітряного витягу.

Зазвичай розрахунок газоповітряного підйомника, головним параметром якого є кількість робочого агента, що нагнітається, для підйому певної кількості пластової рідини зі свердловини, вимагає наступних вихідних даних: пластовий тиск, намічений дебіт, глибина свердловини, щільність рідини, газовий фактор. Виходячи з цього можна визначити питому витрату газу R_{max} :

$$R_{max} = \frac{3,88 L^2 \rho}{d^5 (P_1 - P_2) \lg P_1 / P_2},$$

де P_1, P_2 - тиск у черевика та гирла відповідно;

L - Довжина підйомника;

ρ - густина рідини.

Розрахунок загальноприйнятими методами питомої витрати робочого агента, що нагнітається R_{max} з урахуванням надходження газу із пласта здійснюється наступним чином:

$$R_{u.max} = R_{max} G,$$

де G - газовий фактор

У разі проведення робіт за технологією ОХВ при впливі пружними коливаннями на водонафтогазонасичені пласти в останніх проявляються такі ефекти: гравітаційна сегрегація в полі коливань пластового флюїду на водяну та нафтову фази; переформування фільтраційних потоків за рахунок того, що відповідно до рівняння Прандтля під дією імпульсу краплі легшої рідини (нафти) отримують більше прискорення, ніж вода, внаслідок чого краплі нафти «проштовхуються» в зону відбору газліфта; дегазація під впливом пружних коливань пластової рідини (нафти, води) та скелета колектора від раніше розчиненого або адсорбованого в порових каналах газу, що призводить до

збільшення об'ємної газонасиченості пласта.

В процесі хвильового впливу газ, що виділився з карбонізованої пластової води, нафти і породи фільтрується вгору по пласту і в зону відбору свердловини. У першому випадку здійснюються «підживлення» та стабілізація тиску газової шапки, що підвищує пластовий тиск та ефективність припливу. У другому випадку додавання до первинного газового фактора додається виділився в пласті при хвильовому впливі газ. У цьому випадку в рівнянні витрати робочого агента, що нагнітається, з'являється додатковий член, пов'язаний з дегазацією:

$$R_{н, max} = R_{max} - G - q,$$

де G -газовий фактор дегазації

Таким чином, за рахунок витіснення нафти та дегазації пластового насиченого пористого середовища, по-перше, змінюватиметься режим роботи пласта, пов'язаний зі збільшенням притоку нафти та газу. По-друге, як впливає з узагальненого рівняння витрати, вища газова компонента ($G+q$) забезпечує зниження витрати газового агента, що закачується.

Таким чином, як мінімум однакова продуктивність газліфту може бути досягнута при меншій витраті агента, ніж забезпечується зростання коефіцієнта корисної дії (ККД) газліфту. Проведені розрахунки та геофізичні дослідження свердловин показують, що у фазі розтягування поздовжньої хвилі, що збуджується при хвильовому впливі, перерізи порових каналів змінюються до 10%, у зв'язку з чим збільшується приплив пластового флюїду, за вимірами, до 15...20% [44]. Зростання припливу та дегазація забезпечують покращення гідродинамічної рівноваги в системі «свердловина – пласт», стійку роботу газліфту і, у крайньому випадку, мінімізацію часу зупинок. Технологічна схема пропонованого способу наведена на рисунку 4.8, де 1 - свердловина, що ініціює, 2 - видобувна свердловина, 3 - продуктивний пласт, 4 - хвильові фронти, 5 - повітряна труба,

Відповідно до технологічної схеми одночасно з роботою газліфту здійснюють хвильовий вплив, принаймні, в одній із свердловин (нагнітальної, п'єзометричної, зупиненої на ВРХ) на відстані 3...4 км від видобувної газліфтної

свердловини.

Оптимізація витрати робочого агента, що нагнітається, досягається тим, що в процесі роботи газліфта здійснюють об'ємний хвильовий вплив на продуктивний пласт і поступово знижують витрату газу до моменту настання гідродинамічної рівноваги між припливом суміші рідини і надходить з пласта газу і відбором пластової рідини, яке визначається за настанням стійкої роботи газліфт.

Слід сказати, що розглянута технологічна схема може бути застосована також при насосному видобутку нафти. Але в цьому випадку відбір нафти повинен проводитися безперервно із верхньої частини продуктивного пласта [47].

Область застосування запропонованого способу хвильового супроводу свердловин, що експлуатуються газліфтним способом, може бути розширена за рахунок створення спеціальних хвильових пристроїв [17], а також його застосування при оптимізації робіт з ліквідації ускладнень у свердловинах, при видобуванні високопарафінових в'язких нафт, при вирішенні деяких питань підвищення ефективності робіт глибинно-насосних установок Ці завдання мають велике практичне значення і були висвітлені у низці робіт [52, 55, 56].

Існує ряд можливих ускладнень під час експлуатації газліфтних свердловин [52]. До таких ускладнень ставляться:

- відкладення у насосно-компресорних трубах, викидних лініях, а також у привибійній зоні свердловин асфальтенів, смол, парафінів;
- освіту піщаних пробок як у вибої свердловин, і у витягу;
- відкладення солей у різних елементах системи;
- пульсації у роботі фонтанної свердловини.

При зниженні тиску вільний газ, що виділяється з нафти, знижує її розчинну здатність та утворює межі розділу, які провокують утворення твердої фази у вигляді мікрокристалів парафіну та церезину, а також мікроагрегатів асфальтенів та смол. Експериментально встановлено, що глибина початку відкладень парафіну збігається із глибиною початку виділення газу. Цілком очевидно, що відкладення парафіну в підйомнику призводять до порушення

нормальної роботи свердловини, а саме зниження її дебіту і ККД процесу підйому.

Виявлено, що використання технології ОХВ спільно з газліфтним способом експлуатації дозволяє уникнути ряд розглянутих вище ускладнень при прояві режиму розчиненого газу і запобігти зменшення вибійного тиску при експлуатації свердловини [73].

4.4. Застосування технології об'ємного хвильового впливу при закінченні свердловин

Загальною тенденцією світової нафтогазовидобувної галузі є зміна структури запасів вуглеводневої сировини. Замість виснажених родовищ із спочатку високодебітними свердловинами та високопроникними потужними колекторами розробники змушені вводити в експлуатацію родовища з малопотужними пластами та з невисокими ФЕС, а також законсервовані пласти зі складними умовами розробки. Перехід на розробку глибоких пластів (6 км і глибше) вимагає колосального зростання витрат через збільшення вартості буріння і освоєння свердловин в цих умовах. Існуюча ситуація може бути суттєво пом'якшена за рахунок посилення науково-дослідних та дослідноконструкторських робіт. Зокрема, у міру вдосконалення ГІС відчизняними та зарубіжними вченими при повторних роботах на старих і добре освоєних родовищах виявляється значне число про «пропущених» пластів [92]. Це пояснюється тим, що при первинних роботах з менш досконалою технікою та технологією такі пласти не могли бути ідентифіковані. Крім того, виявляються складно збудовані зони повторного насичення після багатьох років експлуатації. У цих умовах різко зростають вимоги до якості буріння геологорозвідувальних та експлуатаційних свердловин і, зокрема, до робіт із закінчення, випробування та освоєння свердловин. Рівень цих робіт повинен забезпечити мінімізацію ризику пропуску слабовиражених продуктивних пластів, виявлення та диференціацію продуктивних товщ, «замаскованих» при їх розтині кольматантами або глинистою кіркою. Крім того,

Вирішення цих дуже актуальних завдань може бути оптимізовано за рахунок застосування хвильової технології об'ємного впливу на привибійну та дальню зони продуктивного пласта.

Теоретичними та промисловими дослідженнями доведено [50, 83], що низькочастотні коливання помітно впливають на структурно-реологічні властивості пластових рідин; зокрема, відзначається зниження об'ємної та зсувної релаксації для важких нафт і в'язких суспензій.

Вплив пружних полів у діапазоні низьких частот на порові кольтанти виявляється у появі по відношенню до забруднювачів інерційних сил, що страгують, пропорційних коливному прискоренню, а також різниці щільностей рідких фаз: важкої нафти і газоводонафтових пластових рідин. У той же час збільшення проникності колектора відзначалося також за рахунок виникнення зсувних деформацій в полі пружних хвиль. Зазначені передумови апріорі свідчать про переваги застосування технології об'ємного хвильового впливу, що обговорюється в магістерській роботі: низька частота пружних хвиль і велика потужність поперечних хвиль зсуву (S-хвиль) при закінченні і освоєнні свердловин. Ці переваги реалізуються за рахунок запропонованої інноваційної схеми «ГІС – хвильова дія – ГІС» [48] (4.9).

Роботи за цією схемою здійснюються за принципом «до-після». Відразу ж після розкриття продуктивного пласта проводяться ГІС, що дають базові дані, які можуть бути спотворені або замасковані зазначеними факторами. Після цього проводиться хвильова дія, що знищує або знижує вплив цих факторів, і знову проводяться ГІС по «чистому» розрізу свердловини. Зіставлення каротажних даних «до-після», де наводяться діаграми акустичного каротажу (АК), дозволяє впевненіше виділяти продуктивні інтервали. Нижче наводиться приклад проведення робіт за запропонованою схемою «ГІС – хвильовий вплив – ГІС» на св. № 70 (св. Микільська, Сорочинсько-Микільське родовище, Коломацька область).

1. Спочатку МНТП «СпецГІС» проведено каротажі:
 - ІННК апаратурою ІГН-4М в інтервалі 2060 ... 2460 м;
 - МНК апаратурою МНК-2 в інтервалі 2060...2460 м;

- АКШ-ВНЧ двома зондами (2,6 м та 1,4 м) апаратури АКЗ-1 в інтервалі 540...2460 м;

2. Потім на свердловині виконувався об'ємний хвильовий вплив на пласт з метою підвищення параметрів нафтовіддачі.

3. Потім МНТП «СпецГІС» проведено повторні каротажі:

- ІНК апаратурою ІГН-4М в інтервалі 2060...2460 м;
- МНК апаратурою МНК-2 в інтервалі 2060...2460 м;
- АКШ-ВНЧ двома зондами апаратури АКВ-1 в інтервалі 540... 2460 м.

Висновки за результатами інтерпретації фонових та повторних ГІС:

1. За даними ІНК-К, в інтервалі 2436...2444,4 м (пласт Т) відбулося збільшення коефіцієнта нафтонасиченості внаслідок заміни води нафтою. Ефект виділяється при зіставленні вимірів до та після дії за результатами спеціальної обробки ІНК-К та ІНК-Л щодо зменшення декременту згасання ЛАМДА, що обумовлено перерозподілом флюїдів, що насичують породи-колектори, а саме збільшенням кількості нафти.

2. За даними АКШ-ВНЧ зміни стану цементного каменю (руйнування, розтріскування) в інтервалі та по стволу не відзначається.

3. За даними МНК зміни пористості, що свідчить про порушення структури породи (руйнування або ущільнення), в інтервалі впливу і стовбура не відзначається.

Змін за гамма-каротажем (ГК) за період впливу не встановлено.- Відзначається нафтонасиченість інтервалів 2139,2...2142,4 м - пласт 02; 2162,0...2163,2 м - пласт 03; 2164,4...2165,6 м - пласт 03; 2172,8...2177,6 - пласт 03; 2188,8...2193,8 м - пласт 04; 2212,0...2214,0 м - пласт 05-а; ..2290,8 м - пласт 05-6, раніше інтерпретованих як водонасичені. Рекомендуються для випробувань на нафту.

У зв'язку з об'ємами геофізичних і гідродинамічних досліджень, що постійно розширюються, добувних свердловин, підвищенням вимог до ефективності та якості контролю роботи останніх технологія об'ємного хвильового впливу може бути ефективно використана також у комплексі «експлуатаційний каротаж - хвильовий вплив - експлуатаційний каротаж»

(дебітомір, витратомір, термометр та ін.).

Введення в експлуатацію законсервованих або «пропущених» низькопроникних пластів пов'язане зі значними труднощами, головним чином при виклику припливу. Широко поширеним методом підвищення продуктивності свердловин, що розкрили низькопроникні карбонатні колектори, є обробка ГОП соляно-кислотним розчином. Такі обробки проводяться вже на стадії освоєння свердловин та повторюються у процесі їх експлуатації. Головний недолік соляно-кислотної обробки (СКО) пов'язаний з малою глибиною проникнення реагентного розчину пласт. Існуючі методи ініціювання процесу СКО, засновані на хвильовому впливі на ПЗП, не усувають цього недоліку через низький енергетичний рівень, малу площу охоплення впливом і коротко імпульсного характеру впливу з неефективним часом контакту розчину і колектора. Подолання цих недоліків можливе за рахунок застосування комплексної технології «СКО – ОХВ». Ефективність такого комплексу заснована на значному обсязі охоплення пласта, створенні в ньому низькочастотного, довгоперіодного процесу утворення стоячих хвиль та щодо повільного переміщення реагентного розчину в порово-тріщинуватому колекторі.

При комплексуванні об'ємного хвильового впливу та СКО відзначаються:

- збільшення глибини проникнення кислоти за рахунок «розхитування» скелета колектора, реанімації та утворення нових мікротріщин, зниження фільтраційного опору;

- збільшення швидкості та повноти реакції за рахунок «струшування» реагенту, омивання нових капілярних поверхонь;

- збільшення повноти винесення продуктів реакції із пласта за рахунок зменшення сил зчеплення при хвильових коливаннях стінок фільтраційних каналів.

4.5. Особливості технології хвильового впливу на нетрадиційні джерела вуглеводнів - метанокутні та сланцеві резервуари.

Підставою для розробки та промислового випробування цієї технології стали дві обставини:

- величезний інтерес, що виявляється у всьому світі і, особливо, у країнах, що не мають родовищ природного газу, до родовищ метанокутних та сланцевих вуглеводнів [53];

- високі потенційні можливості саме технології об'ємного хвильового впливу для ініціювання специфічних сланцевих та метанокутних колекторів, що характеризуються тонко- та мікрошаровими структурами, крайньою неоднорідністю, низьким пластовим тиском та обводненістю.

Сьогодні є величезний потенціал для видобутку нетрадиційних ресурсів (таблиця 4.10), лише питання ефективних раціональних технологій видобутку та вилучення нетрадиційних вуглеводнів залишається відкритим.

Існуючі на сьогоднішній день і широко застосовувані, головним чином США, технології видобутку нетрадиційного газу засновані на бурінні величезної кількості свердловин (багатьох десятків тисяч) і проведенні масових гідророзривів пластів, ефективність яких істотно нижча, ніж на родовищах нафти та природного газу. Цим пояснюється високовитратність застосовуваних способів розробки родовищ сланцевого газу, у зв'язку з чим вартість продукції (300/1000 м³) кратно вище вартості природного газу (50/1000 м³).

В результаті аналізу умов розробки сланцевих пластів та характеристик метанокутних родовищ була обґрунтована доцільність включення до комплексу цих робіт технології інтегрального низькочастотного об'ємного впливу на газомісткі пласти.

Слід зазначити також, що розроблена технологія є першим досвідом хвильового збудження пластів, що містять газ, оскільки всі попередні дослідження виконувались відчизняними і зарубіжними промисловцями на нафтових родовищах.

Для експериментальних робіт з технології ОХВ на метанокутні пласти обрано ініціюючу свердловину №1.2. Характеристика свердловини подана у таблиці 4.12.

Категорія свердловини – експериментальна;

штучний забій – 640,0 м;

поточний забій – 608,7 м;

пластовий тиск (розрахунковий) - 5,8 МПа;

інтервали перфорації експлуатаційної колони: 582...584 м-код (пласт 56); 543,5...545,4 м (пласт 57); 525,5-527,8 м (пласт 58); 494,0 ... 499,0 м (пласт 60-59).

Як видно з наведеного аналізу гірничо-геологічних умов, родовище характеризується тим, що продуктивна товща є тонкошаровим середовищем, утвореним п'ятьма метанокутними пластами. Це призводить до виникнення при ОХВ значної кількості хвиль різного типу, що виникають при перетворення тонких шарів. Відбиті та пружні хвилі, що проходять через такі шари, утворюються за рахунок накладання величезного числа елементарних хвиль, що відбиваються як усередині кожного тонкого шару, так і при переображеннях між окремими шарами.

У цьому випадку замість шару, розташованого між двома напівпросторами, необхідно розглядати багатошарову зону (4.12)

При цьому сейсмоакустичні характеристики багатошарової зони замінюються добутком динамічних матриць всіх шарів.

Слід мати на увазі, що крім відбитих і кратно-відбитих у кожному з тонких шарів хвиль виникають головні, обмінні, заломлені та інші типи хвиль.

Число елементарних хвиль у шаруватих середовищах зростає за експонентним законом. І тут елементарні хвилі що неспроможні спостерігатися порізно. Інтерференція великої кількості елементарних хвиль призводить до утворення складних хвильових груп. У цьому випадку для аналізу хвильових процесів у неоднорідному шаруватому середовищі ефективним є модальна теорія, згідно з якою хвильове поле утворюється сумою нескінченного числа мод Релеєвського і Лявівського типів, що являють собою стоячі коливання у вертикальній площині і хвилі, що біжать, в горизонтальній площині. Коливання, що переносяться R-модами, поляризовані у вертикальній площині. Моді L-типу переносять лише горизонтальні коливання SH, поляризовані в напрямку перпендикулярно до поширення хвилі. Такі моди нормальні. Суттєвою їх особливістю є те, що

ослаблення їх з відстанню відбувається лише за рахунок геометричної розбіжності, (тобто у ступеня $-Vz$), внаслідок чого енергія, що переноситься цими модами, слабо згасає з відстанню.

Геоакустична характеристика тонкошарових середовищ Талліннського родовища свідчить про наявність пластів зі зниженою швидкістю, які є хвилеводами. У цьому випадку в таких шарах утворюються каналові хвилі, поширені на значні відстані (зокрема, в океанічних хвилеводах такі хвилі поширюються на відстані сотні та тисячі кілометрів).

Зазначені особливості сейсмоакустичних характеристик геосередовища обґрунтовують необхідність інтегрального підходу до аналізу хвильового впливу. У цьому випадку методи селективного впливу на кожен тонкий шар, крім складності технічної реалізації хвильової технології, не можуть бути адекватно описані, так як не враховується взаємовплив хвиль, що утворюються в тонкому шарі. Очевидно, найбільш ефективним є розгляд загалом тонкошарової зони, укладеної між двома напівпросторами. Сумарна енергія інтерференційного хвильового поля, що збуджується при хвильовому впливі в тонкошаристій зоні, забезпечує максимум ККД сейсмічного впливу. Для реалізації такого підходу в технології об'ємного хвильового впливу джерело хвильового поля поміщають у напівпросторах, між якими укладена шарувата зона.

Характеристики одиничного тонкого шару в напівпросторі зокрема, інтерференція хвиль у тонких шарах шаруватого середовища призводить до зниження частоти хвиль, що збуджуються в середовищі [22] внаслідок розсіювання високочастотних компонентів поля.

Частотна характеристика шаруватої системи, що складається з низки тонких шарів, визначається добутком частотних характеристик цих шарів. З теорії інтерференційних систем відомо, що їхнє застосування завжди означає зниження основної частоти частотної характеристики [28, 77].

Виходячи з викладеного, при розробці технології об'ємного хвильового впливу збудження сигналів здійснюється не всередині тонкошарової точки гірських порід, а в середовищах, що вміщують її.

При цьому сейсмоакустичні характеристики визначаються не фізичними властивостями кожного шару, а амплітудно-частотними та швидкісними характеристиками всієї багатопластової товщі.

Зокрема, частотна характеристика середовища визначається так:

$$H(\omega) = H_1(\omega) \cdot H_2(\omega) \dots H_n(\omega),$$

де H - Інтегральна частотна характеристика;

H_1, \dots, H_n - частотні характеристики тонких шарів,

$$H(\omega) = \frac{S_{вх.}(\omega)}{S_{вих.}(\omega)},$$

де $S_{вх.}(\omega)$ $S_{вих.}(\omega)$ - Спектри вхідних і вихідних сигналів пружних хвиль в тонких шарах.

Таким чином, сейсмоакустичні характеристики геосередовища, утвореного інтегрованими тонкими шарами, є також інтегральними, узагальненими за обсягом. Це визначає доцільність та закономірність застосування методів інтегрального об'ємного хвильового впливу на багат шарову продуктивну товщу.

Залучення у розробку малодренуємих ділянок чи вилучення заблокованих запасів здійснюється з допомогою застосування технології площадного тривалого циклічного імпульсного хвильового на продуктивні пласти в діапазоні низьких і інфранизьких частот. Вплив здійснюється за допомогою спеціального хвильового джерела, що опускається у свердловину на каротажному кабелі та встановлюється у відкритій або перфорованій зоні. Внаслідок цього в продуктивному пласті, що володіє хвилеводними властивостями, виникає періодичний слабозатухаючий хвильовий процес (аналог стоячих хвиль), що характеризується інтерференцією хвиль, що перебиваються всередині шаруватої пачки. Цей процес супроводжується утворенням в обсязі пласта пучностей та вузлів деформацій (напруг).

Потенційна енергія напруги, що концентруються в процесі ОХВ в околиці вузлів стаціонарних хвиль, викликає періодичні деформації гірського середовища в таких областях пласта. Це призводить, у свою чергу, до виникнення процесів пульсуючого зміни (зменшення або збільшення) вторинної

порожнечі (пористості, тріщинуватості) колектора.

Таким чином, виникає як би поршневий ефект, що супроводжується виникненням локальних градієнтів тиску в пористому середовищі на тлі загального градієнта P_{Σ} напрямку областей відбору.

$$P_{\Sigma} = \Delta P_{пл} + \Delta P_{хв},$$

де $\Delta P_{пл}$, $\Delta P_{хв}$ - градієнти пластового та хвильового тисків.

Таким чином, пружна енергія, що транспортується в пласт при хвильовому впливі, відновлює виснажені її запаси в пласті, що призводить до уповільнення падіння середньозваженого тиску. Це супроводжують як чисто газовий, і водонапірний режими роботи пласта.

Основним ефектом сейсмоакустичної дії на газову фазу в середовищі є різке збільшення проникності, що призводить до дегазації гірських порід [24]. Прояв цього ефекту пов'язаний не так з формуванням додаткової тріщинуватості, як зі зміною характеру тертя при русі газу в поровому просторі. Відомо, що у разі знакозмінних пружних коливань «статичне» тертя замінюється на «динамічне» тертя [44], при якому значно прискорюється міграція газу.

Ефекти масообміну між різнонапруженими зонами, що виникають при хвильовому впливі за допомогою фільтраційного, дифузного та конвективного масопереносу та пов'язані з появою градієнтів тиску, не зникають після зняття хвильових полів. У системах, що знаходяться в напружено-деформованому стані і включають пластові агрегати у вигляді насичених пористих середовищ, післядія охоплює тривалий часовий проміжок. Процеси масопереносу, що виникають при хвильовому впливі, можуть продовжуватися протягом багатьох місяців після його припинення.

Виникнення ефектів післядії у разі застосування хвильової технології відбувається внаслідок накопичення локальних ефектів від тривалої серії слабких впливів.

Фактор збільшення повноти та прискорення виходу газу пов'язаний з утворенням локальних зон перепаду тиску при проходженні пружних хвиль. Тиск, що виникає на фронті пружної хвилі, що проходить, призводить до виникнення ефекту пружного поштовху при виконанні умови, пов'язаного з

порушенням пружної рівноваги в пласті.

Технологія робіт з хвильового впливу на продуктивні пласти заснована на реалізації основних його особливостей, таких як:

- створення областей напружено-деформованого стану гірських порід за рахунок пружної деформації, що циклічно додається, що накопичується в геосередовищі;

- створення областей стиснення і розтягування гірських порід, що чергуються, за рахунок утворення вузлів і пучностей стоячих хвиль;

- активація тріщинуватих зон, розвиток нових та реанімація («розпарювання») залікованих тріщин за рахунок втомних деформацій, викликаних тривалими різноспрямованими напруженнями, що розвиваються в геосередовищі при циклічному впливі.

Особливе значення має реалізація фазних мікроперепадів (стрибків) тиску на фронті пружних хвиль щодо інтенсифікації припливу залишкових зацемлених запасів у тупикових блокованих зонах.

Циклічні градієнти тиску на межі зацемленого газу та блокуючої води ДРГ призводять до прориву бульбашок газу через кордон та руху останніх до зон відбору. У той же час, вертикальна дифузія газу при циклічних вертикальних градієнтах ДРВ призводить до дифузії газу з погано проникних в пласти, що інтенсивно дреноються, з хорошими фільтраційними характеристиками. Ефекти «проштовхування» газу по пласту в зону відбору та міграції його через межі пропластків з різними проникностями пов'язані з діями кратно-відбитих усередині пласта хвиль (КВ) та головних хвиль (ГВ), що ковзають вдалину акустичних кордонів (4.13). В останньому випадку досягається також ефект ініціювання прикордонних течій, що забезпечують рух УВ у зонах з низькими швидкостями течії.

Розрахунок схем об'ємного хвильового впливу здійснювався з урахуванням інтерференційного принципу Гюйгенса-Френеля, у своїй області максимальної енергії на об'єкт ініціювання визначається радіусом першої зони Френеля.

Враховуючи складність будови метанокутних продуктивних відкладень, у

ряді випадків може застосовуватися схема двопозиційної хвильової дії (4.14). Така схема передбачає створення в пласті складного інтерференційного поля стоячих хвиль, утвореного накладенням пружних коливань, що збуджуються

Висновки за розділом 4

1. Виявлено, що комплексні технології «ГРП - хвильовий вплив» передбачають вплив безпосередньо на ПЗП.

2. Встановлено, що на відміну від відомих способів об'ємного хвильового впливу, представлений у магістерській роботі, передбачає хвильовий вплив на весь об'єм пласта, що містить також область гідророзриву.

3. Встановлено, що оптимізація роботи газліфту досягається за рахунок застосування їх у комплексі з технологією хвильового впливу. За рахунок витіснення нафти та дегазації пластового пористого середовища при об'ємному хвильовому впливі досягається збільшення припливу нафти, а збільшення газової компоненти за рахунок дегазації нафти забезпечує зниження витрати газового агента, що закачується.

4. Застосування технології об'ємного хвильового впливу при закінченні свердловин дозволяє:

- за рахунок реалізації технологічної схеми «ГІС – ОХВ – ГІС» підвищити надійність виявлення продуктивних інтервалів та знизити ризик помилкових рішень, зокрема, з проблеми «пропущених» пластів;

- за рахунок реалізації схеми «СКО – ОХВ» підвищити якість та прискорити освоєння свердловин.

5. Встановлено, що технологія хвильової дії на метанокутні пласти має принципові відмінності від традиційних методів хвильової дії на теригенні та карбонатні колектори:

- продуктивна товща повинна розглядатися як об'єкт впливу як комплекс тонких шарів, що має узагальнені інтегральні акустичні властивості;

- технологія хвильового впливу може бути успішною лише у варіанті об'ємного збудження пласта.

6. Найбільш ефективною представляється технологія об'ємного

двопозиційного суміщеного впливу, яке повинно здійснюватися у середовищі з боку верхньої і нижньої меж продуктивної шаруватої товщі.

7. Виявлено, що тривалість циклу хвильового на метаногольного пласти з їх високої енергоємності має становити 70..120 годин, тобто. значно більше, ніж за локальному хвильовому впливі.

ОСНОВНІ ВИСНОВКИ

1. Встановлено, що процес розробки родовищ, особливо родовищ з важковилученими запасами, в умовах падаючого видобутку, високої обводненості та втрат пластового тиску потребує широкого застосування спеціальних технологічних прийомів для підтримки обсягів та стабілізації зниження видобутку. Створено значну кількість методів інтенсифікації продуктивних пластів родовищ нафти та газу. Більшість їх застосовується розробки нафтових родовищ, поодинокі роботи виконані для газових родовищ, нафтових облямівок НГКР за повної відсутності технологій на пласти нетрадиційних джерел вуглеводнів - метаноугольних і сланцевих родовищ.

2. Дано теоретичне обґрунтування та виявлено геологотехнологічні передумови супроводу хвильових технологій. Виявлено необхідність розгляду хвильових явищ у значних обсягах геосередовища, що включає продуктивний пласт у цілому та хвильові процеси в його привибійній зоні. Виявлено, що принципи об'ємного хвильового впливу, що розробляються в магістерській роботі, визначають застосування методів узагальненого аналізу хвильових полів, що збуджуються в нижньому напівпросторі, на основі класичної теорії поля.

3. Обґрунтовано технологію фокусованого низькочастотного об'ємного хвильового впливу на продуктивні пласти, що охоплює значні ділянки пласта (в цілому до 6 км від точки проведення впливу) з метою збільшення вуглеводневої віддачі та відновлення пружної енергії пласта.

4. Розроблено комплексні багатofакторні хвильові технології інтенсифікації процесів видобутку нафти та газу, що забезпечують за умови поєднання переваг кожної технології досягнення синергетичного ефекту. Розроблено технологію об'ємного хвильового впливу в комплексі з ГРП. Дано теоретичне обґрунтування об'ємного хвильового супроводу газліфтної експлуатації на прикладі нафтової облямівки газонафтового покладу Яблунівського НГКР. Розроблено хвильові методи оптимізації технології закінчення свердловин з метою вирішення проблеми «пропущених пластів», запобігання кольматації та покращення умов припливу.

Для виконання даних операцій при розробці комплексних багатofакторних хвильових технологій об'ємного впливу розроблені конкретні техніко-технологічні схеми як при прямій ініціації пласта, так і в комплексі з ГРП, СКО, при закінченні свердловин на родовищі.

5. Отримано результати застосування технологій ОХВ як при прямій ініціації газоконденсатних та метанокутних пластів, так і в комплексі з ГРП:

- отримані результати практичного застосування ОХВ у комплексі з ГРП зі збільшенням дебіту нафти в середньому на 35...37%;

- проведено аналіз робіт з об'ємного хвильового впливу на газоконденсатні пласти, отримано результати застосування технології зі збільшенням дебіту газу на 12,25% - зона 3 ГКР, на 35,6% - зона 2 ГКР;

- результати практичного застосування багатofакторних хвильових технологій об'ємного впливу на метанокутні пласти зі збільшенням припливу газу на 20% .

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Воловецький, В. Б., Коцаба, В. І., Витязь, О. Ю., Щирба, О. М., Дюмін, А. В., Гнітко, А. В., & Василенко, С. В. (2016). Особливості експлуатації газових та газоконденсатних свердловин на завершальній стадії розробки родовищ. *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*, (2), 39-51...
2. Грудз, В. Я., Марущенко, В. В., Братах, М. І., Савчук, М. Т., & Філіпчук, О. О. (2018). Питання експлуатації газовидобувної системи на завершальній стадії експлуатації родовищ: матеріали Міжнародної наукової інтернет-конференції «Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення». № 29. ББК 72я431 ISSN 2522-932X, 86..
3. Хайдарова, Л. І., & Гедзик, Н. М. (2021). ПІДВИЩЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ ВИДОБУВНИХ СВЕРДЛОВИН НА ГАЗОВИХ РОДОВИЩАХ ШЛЯХОМ ПОКРАЩЕННЯ СТАНУ ПРИВИБІЙНОЇ ЗОНИ ПЛАСТА. *EDITORIAL BOARD*, 698..
4. Коцкулич, Я. С., & Коцкулич, Є. Я. (2012). Аналіз ефективності промивальних рідин для первинного розкриття продуктивних пластів..
5. Бойко, В. С., Бойко, Р. В., Кеба, Л. М., & Семінський, О. В. (2007). Обводнення газових і нафтових свердловин..
6. Грицанчук, А. В., & Ткачук, О. І. (2019). ANALYSIS OF EFFICIENCY OF REMOVAL OF LIQUID WITH SELECTION OF GAS WELLS. *Научный взгляд в будущее*, 1(15), 32-35..
7. Філіпчук, О. О. (2019). Розроблення методів підвищення ефективності та керування газопотоками систем збору газу виснажених родовищ (Doctoral dissertation, ІФНТУНГ)..
8. Коцкулич, Я. С. (2008). Стан якості первинного розкриття продуктивних пластів з аномально низькими тисками. *PRECARPATHIAN BULLETIN OF THE SHEVCHENKO SCIENTIFIC SOCIETY Number*, (1 (1)), 203-207..
8. Коцкулич, Є. Я. (2014). Особливості первинного

- ...дуктивних пластів на родовищах Бориславського нафтопромислового району. *Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент-технология и технология его изготовления и применения..*
9. Алексеев, А. (2005). Новітні технології—надійний ключ до успіху. *Вісник Національної академії наук України*, (1), 24-31.
 10. Левчук, К. Г., Мойсишин, В. М., & Цидило, І. В. (2016). Вплив механічних властивостей матеріалу на динаміку прихоплених бурильних труб. *Металлофизика и новейшие технологии*.
 11. Михайловська, О. В., & Ситник, С. В. (2018). Вплив хімічних розчинів на утворення гідратів..
 12. Абдуллах, Н., & Кутний, Б. А. ВПЛИВ ЗОВНІШНІХ ЧИННИКІВ НА ПРОЦЕС УТВОРЕННЯ ГІДРАТІВ В ЛАБОРАТОРНИХ УМОВАХ.
 13. Ляшенко, А. В., Макаренко, В. Д., Винников, Ю. Л., & Петраш, О. В. (2021). Oil Wells Hydrate Formation Regularities= Закономірності утворення гідрату нафтових свердловин.
 14. Павленко, А. М., Кутний, Б. А., & Абдуллах, Н. М. (2017). Аналіз умов утворення і дисоціації газових гідратів. *Вестник Приазовского государственного технического университета. Серия: Технические науки*, (34), 60-68.
 15. Воловецький, В. Б., Щирба, О. М., Витязь, О. Ю., & Дорошенко, Я. В. (2013). Збільшення обсягів відбору газу в умовах періодичної експлуатації газоконденсатних свердловин. *Scientific Bulletin of Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas*, (2 (35)), 111-121..
 16. Воловецький, В. Б., Витязь, О. Ю., Коцаба, В. І., Щирба, О. М., & Витвицька, О. М. (2015). Аналіз ускладнень при експлуатації газових і газоконденсатних свердловин та шляхи боротьби з ними. *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*, (2), 78-88.
 17. Воловецький, В. Б., Щирба, О. М., Витязь, О. Ю., & Дорошенко, Я. В. (2013). Збільшення обсягів відбору газу в умовах періодичної

- експлуатації газоконденсатних свердловин. *Scientific Bulletin of Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas*, (2 (35)), 111-121..
18. Воловецький, В. Б., Щирба, О. М., Величко, В. В., Витязь, О. Ю., & Дорошенко, Я. В. (2013). Оптимізація роботи свердловин Наріжнського та Юліївського НГКР. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*, (4), 127..
19. Кондрат, О. Р., & Кондрат, Р. М. (2015). Дослідження впливу зональної неоднорідності продуктивних пластів на характер залежності зведеного середнього пластового тиску від накопиченого видобутку газу з родовища. *Prospecting and Development of Oil and Gas Fields*, (2 (55)), 61-67..
20. Кондрат, Р. М., Дорошенко, В. М., & Кондрат, О. Р. (2007). Особливості завершальної стадії розробки родовищ нафти і газу..
21. Воловецький, В. Б., Коцаба, В. І., Витязь, О. Ю., Щирба, О. М., Дьомін, А. В., Гнітко, А. В., & Василенко, С. В. (2016). Особливості експлуатації газових та газоконденсатних свердловин на завершальній стадії розробки родовищ. *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*, (2), 39-51..
22. Матківський, С. В., & Матішин, Л. І. (2022). Оптимізація умов експлуатації газоконденсатних свердловин на завершальній стадії розробки. *MODERN DEVELOPMENT OF SCIENCE AND THE LATEST PERSPECTIVES*, 32, 330..
23. Самойлов, В. В. (2017). Планування промислово-гідрогеологічних досліджень на завершальній стадії розробки вуглеводневих родовищ. *Вісник Харківського національного університету імені ВН Каразіна, серія «Геологія. Географія. Екологія»*, (46), 45-49..
24. Скрильник, К. Ю., Мухаммед, Г. Н. А. Ш., & Кримов, А. П. (2015). Аналіз технологій для підвищення ефективності роботи системи збору газу. *Інтегровані технології та енергозбереження*, (1), 7-13..
25. Воловецький, В. Б., Василенко, С. В., Витязь, О. Ю., Щирба, О. М., Гнітко, А. В., & Величко, В. В. (2017). Оптимізація експлуатації

26. Рой, М. М., & Ластовка, В. Г. (2016). Освоєння та інтенсифікація впливу вуглеводнів методом миттєвих депресій для розширення межі кондиційності колекторів. *320 с.*
27. Ткаченко, С. Й., Резидент, Н. В., & Ішенко, К. О. (2016). *Наближені методи моделювання за умов визначення теплообміну в ньютонівських та неньютонівських рідинах* (Doctoral dissertation, ВНТУ).
28. Кондрат, Р. М., Дремлюх, Н. С., Угриновський, А. В., & Ксенич, А. І. (2017). Експериментальні дослідження характеристик процесу виведення твердої фази з вибою газової свердловини застосуванням пінних систем. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*, (2), 90-96..
29. Драган, І. М. (2017). ШЛЯХИ ЗНИЖЕННЯ ВАРТОСТІ РЕМОНТНИХ РОБІТ В НАФТОГАЗОВИХ СВЕРДЛОВИНАХ WAYS TO REDUCE THE COST OF REPAIRS TO OIL AND GAS WELLS. *SWo rld*, 78..
30. Рудько, Г. І., & Адаменко, О. М. (2017). Стратегічна геоecологічна оцінка та прогноз стану довкілля Західного регіону України.
31. Векерик, В. І., & Міронов, Ю. В. (2001). Параметри та конструктивне виконання бурових вишок мобільних установок для буріння і ремонту свердловин..
32. Лазаренко, О. Г., & Лівінський, А. М. (2014). Досвід буріння горизонтальних свердловин на Гнідинцівському родовищі. *Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент-техника и технология его изготовления и применения*, (17), 47-52..
33. Кунцяк, Р. Я. (2011). *Удосконалення технології буріння похило-скерованих та горизонтальних свердловин в нестійких породах (на прикладі родовищ Дніпрово-Донецької западини)* (Doctoral dissertation, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу)..
34. Глушич, В. Г. (2002). Вигин бурильної колони та вибір траєкторії буріння горизонтального бічного стовбура свердловини.

46. Липовий, В. О., & Удяньський, М. М. (2017). Техногенні ризики забруднення доквілля під час експлуатування та ремонтних робіт резервуарів з нафтопродуктами..
47. Немах, А., Донський, Д. Ф., & Нестеренко, С. В. (2019). Вивчення впливу CO₂ і H₂S і температури пластової води нафтового родовища на розвиток пітингової корозії. *Комунальне господарство міст. Серія: Технічні науки та архітектура*, (3), 58-68..
48. Петрина, Ю. Д., Гоголь, М. М., Петрина, Д. Ю., Гоголь, В. М., & Сидор, П. Я. (2014). Аналіз корозійного руйнування внутрішніх поверхонь обладнання для зберігання нафти. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*, (3), 166-175..
49. Ткачук, В. В., & Топільницький, П. І. (2022). ДОСЛІДЖЕННЯ КОРОЗІЇ НАФТОТРАНСПОРТНОГО ОБЛАДНАННЯ. *СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ ПЕРЕРОБКИ ПАЛЬНИХ КОПАЛИН*, 84..
50. Левчук, Т. А., Вембер, В. В., Носачова, Ю. В., & Космина, М. М. (2020). Процеси біологічної корозії в нейтральному водному середовищі в присутності іонів перехідних металів. *Матеріали XXI Міжнародної науково-практичної конференції «Екологія. Людина. Суспільство»(21-22 травня 2020 р., Київ, Україна)*..
51. Крижанівський, Є. І., & Полутренко, М. С. (2012). Підвищення ефективності пасивного захисту підземних споруд від корозії. *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*, (1)..
52. Макаренко, В. Д., Кіндрачук, М. В., Бондарев, А. А., & Макаренко, Ю. В. (2015). Дослідження механізму наводнювання металу нафтопроводів. *Компрессорное и энергетическое машиностроение*, (1), 6-9..
53. Дмитренко, В. І. (2012). Вплив низькомолекулярних водорозчинних карбонових кислот на вуглекислотну корозію сталі газопромислового обладнання..

54. Макаренко, В. Д., Лукач, В. С., Василюк, В. І., Козаченко, Н. В., & Гараборкін, Л. А. (2016). Дослідження корозійних процесів екологічно небезпечних в експлуатації металоконструкцій. *Проблеми тертя та зношування*, (1), 131-136..
55. Магльована, Т. В. (2015). Інгібітори корозії пожежно-технічного обладнання на основі комплексів металів із солями полігексаметиленгуанідину. *Пожежна безпека: теорія і практика*, (19), 95-99..
56. Воловецький, В. Б., Гнітко, А. В., Василенко, С. В., Щирба, О. М., Коцаба, В. І., & Величко, В. В. (2018). Експлуатація газоконденсатних свердловин в умовах низьких робочих тисків.
57. Кондрат, О. Р., & Петрушак, С. М. (2017). Лабораторна установка для створення твердих поверхнево-активних речовин..
58. Побережний, Л. Я., Грицанчук, А. В., & Мазур, М. П. (2017). Вплив тривалої експлуатації та гідратуутворення на довговічність матеріалу шлейфів.
59. Семеняка, О. Г., Кушнар'єв, С. І., Коцаба, В. І., Воловецький, В. Б., & Щирба, О. М. (2019). Дослідно-промислові випробування технології освоєння свердловин для відновлювання продуктивності.
60. Воловецький, В. Б., Василенко, С. В., Витязь, О. Ю., Щирба, О. М., Гнітко, А. В., & Величко, В. В. (2017). Оптимізація експлуатації газоконденсатних свердловин на завершальній стадії розробки родовищ.
61. Семенов, Г. Н., & Фадєєва, О. В. (2007). Аналіз і синтез автоматизованих систем управління технологічним процесом буріння нафтових і газових свердловин. *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*, (5), 117-122..
62. Дремлюх, Н. С. (2018). *Підвищення ефективності експлуатації свердловин з нестійкими колекторами на виснажених газових родовищах* (Doctoral dissertation, ІФНТУНГ)..
63. Afghoul, A., Amaravadi, S., Boumali, A., Calmeto, J., Lima, J., Lovell,

- J., ... & Staal, T. (2014). Coiled tubing: the next generation. *Oilfield Rev*, 6(4), 9-23.
64. Дремлюх, Н. С. (2013). Способи ліквідації піщаних корків на вибоях свердловин з нестійкими колекторами..
65. Кондрат, Р. М., & Хайдарова, Л. І. (2018). Методика розрахунку параметрів газліфтної експлуатації обводнених газових свердловин при надходженні на вибій газу і води з різних пластів. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*, (1), 60-64..
66. Бойко, В. С., & Мішук, Б. М. (2015). Метод і методика розрахунку вибієного тиску у діючих фонтанних свердловинах з ускладненими умовами експлуатації. *Prospecting and Development of Oil and Gas Fields*, (4 (57)), 19-26..
67. Бойко, В. С., Грибовський, Р. В., Бойчук, Т. Р., & Мішук, Б. М. (2015). Метод і методика оптимізації процесу фонтанування діючих свердловин на основі положень теорії висхідних газоводонафтових потоків. *Oil and Gas Power Engineering*, (2 (24)), 16-22.
68. АТЛАС РОДОВИЩ НАФТИ І ГАЗУ УКРАЇНИ, Атлас. Львів: УНГА, 1998.
69. МОХНІЙ, І. Ю.; ГЛАДКИЙ, С. І. Розвиток колтубінгових технологій в ПАТ "Укргазвидобування". 2018.
70. Afghoul, A., et al. "Coiled tubing: the next generation." *Oilfield Rev* 6.4 (1994): 9-23.
71. Leising, Larry J., and Kenneth R. Newman. "Coiled-tubing drilling." *SPE drilling & completion* 8.04 (1993): 227-232.
72. Hillis, Richard R., et al. *Coiled Tubing Drilling and Real-time Sensing: Enabling prospecting Drilling in the 21st Century?*. Deep Exploration Technologies Cooperative Research Centre, 2014.
73. Ladmia, Abdelhak, et al. "Underbalance Coiled Tubing Drilling in Tight Gas Reservoir Study Case Onshore Field, Abu Dhabi." *Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference*. OnePetro, 2020.