

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ
ІВАНО-ФРАНКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ НАФТИ І ГАЗУ

На правах рукопису

ГУТАК ОЛЕКСАНДР ІГОРОВИЧ



УДК 622.276.6

УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ВИДОБУТКУ
ВУГЛЕВОДНІВ ШЛЯХОМ РІЗНОЧАСТОТНОГО ІМПУЛЬСНО-ХВИЛЬОВОГО
ВПЛИВУ НА НАФТОГАЗОНАСИЧЕНІ ПОРОДИ

05.15.06 – Розробка нафтових та газових родовищ

Дисертація на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Науковий керівник

Тарко Ярослав Богданович

доктор техн. наук, професор

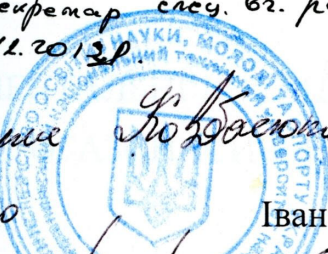
всі примірники дисертації ідентичні за змістом

Вчений секретар спец. вг. ради ДНО.ОСЛ.ОЛ

19.12.2012р

Ковбасюк І.М.

Підпис Ковбасюк І.М.
посвідчує



Івано-Франківськ – 2012



d468

ЗМІСТ

	Стор.
ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1	
СУЧАСНИЙ СТАН ТЕХНОЛОГІЙ ТА ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ В ОБЛАСТІ ІМПУЛЬСНО-ХВИЛЬОВИХ МЕТОДІВ ДІЇ НА ПРОДУКТИВНІ ПЛАСТИ.....	9
1.1 Класифікація хвильових технологій по типу використовуваних коливань.....	9
1.2 Хвильові технології впливу із використанням механічних коливань.....	12
1.3 Хвильові технології впливу із використанням електромеханічних коливань.....	26
Висновки до першого розділу.....	29
РОЗДІЛ 2	
ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ І ОЦІНКА ПОШИРЕННЯ ПРУЖНИХ ХВИЛЬ І ЇХ ВПЛИВУ НА ФЛЮЇДОНАСИЧЕНІ ПОРОДИ.....	31
2.1 Дослідження механізму розповсюдження пружних хвиль в насичених середовищах характерних для родовищ нафти і газу.....	31
2.2 Дослідження характеру розповсюдження циліндричної пружної хвилі в насиченій гірській породі	45
2.3 Теоретична оцінка впливу пружних коливань на нафтогазонасичені породи..	55
2.3.1 Оцінка ефекту зміни капілярного тиску на межі поділу нафта-вода внаслідок хвильової дії.....	56
2.3.2 Дослідження процесу додаткового розгазування нафти в пласті під дією пружних коливань.....	60
2.3.3 Вивчення явища руйнування колоїдно-дисперсних систем в ПЗП під впливом пружних коливань.....	64
2.3.4 Доповнення рівняння фільтрації неньютонівської нафти з врахуванням хвильової дії на пласт.....	70
Висновки до другого розділу.....	78
РОЗДІЛ 3	
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ІМПУЛЬСНО-ХВИЛЬОВОЇ ДІЇ НА НАФТОГАЗОНАСИЧЕНІ ПОРОДИ.....	80

3.1 Розроблення методики і обладнання для оцінки інтенсивності пружних коливань в насиченій гірській породі.....	80
3.2 Визначення коефіцієнта поглинання пружних хвиль в насиченій гірській породі в поверхневих умовах.....	82
3.3 Дослідження впливу пружних коливань на зміну фільтрації нафтоводяної суміші в насипній моделі пласта.....	86
3.4 Дослідження процесу додаткового виділення газу з дегазованої нафти внаслідок хвильової дії.....	92
3.5 Дослідження процесу розповсюдження та суперпозиції пружних хвиль відмінних частот в насиченому пористому середовищі.....	98
3.6 Експериментальні дослідження впливу пружних коливань різних частот на рух рідини в капілярі.....	103
Висновки до третього розділу.....	107
РОЗДІЛ 4	
РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЙ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ НАФТОГАЗОВИДОБУТКУ І РЕЗУЛЬТАТИ ЇХ ВПРОВАДЖЕННЯ.....	109
4.1 Технологія впливу на пласт із використанням вибійних генераторів імпульсів пружних коливань.....	109
4.2 Технологія впливу на пласт із використанням поверхневих пристроїв генерації імпульсів пружних коливань.....	116
4.3 Технологія різночастотного хвильового впливу на нафтогазонасичені породи із використанням вибійних пристроїв з декількома випромінювачами.....	122
Висновки до четвертого розділу.....	127
ВИСНОВКИ.....	128
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	130
ДОДАТКИ.....	147

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

БКНС – блочна кущова насосна станція;

ВНК – водонафтовий контакт;

ГДС – геофізичні дослідження свердловин;

КДС – колоїдно-дисперсні системи;

КМЦ – карбоксиметилцелюлоза;

КРС – капітальний ремонт свердловин;

НКТ – насосно-компресорні труби;

ПАР – поверхнево-активна речовина;

ППТ – підтримання пластового тиску;

ПУ – патент України;

ПЗП – привибійна зона пласта.

ВСТУП

Актуальність теми. В умовах значного дефіциту паливно-енергетичних ресурсів в Україні надзвичайно важливими та актуальними є роботи, спрямовані на підвищення видобутку нафти і газу.

Загальнодержавною програмою розвитку мінерально-сировинної бази України на період до 2030 року, затвердженою законом України від 21 квітня 2011 року N 3268-VI вказано, що одним із вагомих чинників подолання кризового становища в економіці України є належне забезпечення потреб економіки в мінерально-сировинних ресурсах та ефективне їх використання. Прогнозний обсяг видобутку нафти та газового конденсату до 2015 року, згідно цієї програми, становить 5,3 млн. тонн.

Важливим напрямком здійснення цих програмних положень є провадження ефективних методів інтенсифікації дебітів свердловин шляхом дії на привибійну зону пласта. До перспективних та екологічно безпечних способів збільшення видобутку вуглеводнів слід віднести технології, які ґрунтуються на імпульсно-хвильовому впливі на продуктивні пласти в нафтогазовидобувних свердловинах.

Особливістю даних робіт в умовах українських родовищ, які знаходяться на завершальній стадії розробки, є те, що більшість свердловин експлуатує низькопроникні колектори із низькими пластовими тисками.

Процеси розповсюдження і поглинання пружних хвиль у нафтогазонасиченому пласті ще недостатньо вивчені, але попередньо отримані результати дають підставу для висновків про доцільність проведення досліджень в цій області. Важливим для вивчення хвильових процесів є дослідження впливу коливань різних частот і амплітуд на енергетичні характеристики системи пласт-флюїд та характеристики колекторів та флюїдів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота становить складову частину наукового напрямку кафедри розробки та експлуатації нафтових і газових родовищ та Науково-дослідного

інституту нафтогазової енергетики і екології Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу та виконувались за темами ДЗ/369-2007 “Розроблення технології та пристрою імпульсно-хвильової дії для збільшення продуктивності нафтових свердловин” (№0107U009110) і Д-6-10-П “Нові технології видобування вуглеводнів із родовищ з важковилучуваними запасами” (№0110U000116).

Мета і задачі дослідження. *Метою дослідження є удосконалення технології інтенсифікації видобутку вуглеводнів шляхом різночастотного імпульсно-хвильового впливу на нафтогазонасичені породи.*

Основні задачі досліджень:

1. Огляд існуючих технологій, технічних засобів та стану теоретичних і експериментальних досліджень процесів імпульсно-хвильового впливу на пласт.
2. Теоретичні дослідження хвильових процесів і оцінка характеру поширення пружних хвиль і їх впливу на продуктивні пласти та флюїди.
3. Експериментальні дослідження процесу імпульсно-хвильової дії на нафтогазонасичені породи.
4. Розробка технологій діяння на продуктивні пласти та їх промислове випробування.

Об'єктом дослідження є процеси інтенсифікації видобутку вуглеводнів імпульсно-хвильовими методами.

Предметом дослідження є явища розповсюдження пружних хвиль в флюїдонасиченій породі, руйнування продуктів кольматації продуктивного пласта та зміни фазового складу вуглеводнів внаслідок хвильового впливу.

Методи дослідження. У роботі застосовано комплексний метод дослідження, що включає аналітичні методи вивчення розповсюдження пружних коливань при імпульсно-хвильовому впливі на пласт, використано стандартну апаратуру, статистичні методи планування та обробки експериментальних даних, а також перевірку отриманих результатів в промислових умовах.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Отримано рівняння різночастотної суперпозиції циліндричних пружних хвиль в флюїдонасиченому середовищі та вперше встановлено раціональні параметри додаткового градієнту тиску в пласті, отриманого в результаті їх взаємодії та залежність глибини оброблення пласта від відстані між джерелами коливань за різних частот випромінювання.

2. Вперше експериментальними дослідженнями на моделі пласта встановлено, що дія пружними коливаннями інтенсивністю більше $0,01 \text{ Вт/см}^2$ призводить до збільшення фазової проникності для високов'язкої нафти до 25 %, а дія з діапазоном частот 50-500 Гц призводить до збільшення інтенсивності газовиділення в дегазованій за даного тиску нафті та збільшення тиску в модельному середовищі на 3-6 кПа.

3. Вперше експериментально підтверджено утворення низькочастотної хвилі биття внаслідок взаємодії високочастотних хвиль діапазону 50 Гц – 20 кГц з різницею в частоті до 5% в умовах насипної насиченої моделі пласта.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблено 4 технології (2 з них патентозахищені) та 2 патентозахищених пристрої для інтенсифікації видобутку вуглеводнів із використанням різночастотних імпульсно-хвильових методів впливу на продуктивні пласти.

Результати досліджень впроваджено в свердловинах ТОВ “Капітал Ойл Україна”, Калуської НГРЕ, ТОВ “Західенергобуд”. Після застосування імпульсно-хвильових технологій в свердловині 8 Ст. Самбір ТОВ “Західенергобуд” дебіт нафти за контрольними замірами збільшився з 3 до 6 м³/добу, в свердловині в Кубаш Луквинського нафтового родовища ТОВ “Капітал Ойл Україна” – з 0,007 до 0,023 м³/добу, а в свердловині 1-Семаківська Калуської НГРЕ успішно проведено роботи з її освоєння.

Особистий внесок здобувача. Основні наукові результати автором отримані особисто. У працях, опублікованих у співавторстві, особисто дисертантом виконано наступне: отримано рівняння різночастотної суперпозиції циліндричних пружних хвиль в флюїдонасиченому середовищі, проведено оцінку

зміни капілярного тиску, розгазування нафти [9,11,15] та процесу руйнування колоїдно-дисперсних систем. Проведено експериментальну оцінку коефіцієнту поглинання і глибини поширення пружних хвиль в гірській породі [1] і їх впливу на зміну фільтрації нафтоводяної суміші в моделі пласта [2,5,14] та процесу розгазування нафти в пористому середовищі [4,12,13]; експериментально підтверджено утворення низькочастотної хвилі биття внаслідок випромінювання високочастотних складових; проведено експериментальні дослідження впливу пружних коливань різних частот на рух рідини в капілярі; досліджено спектральні квильові характеристики при використанні вибієного [7,8] та поверхневого обладнання [3,6,10].

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на VI міжнародній науково-практичній конференції "Економічне відродження України" (м. Київ, 22 травня 2009 р.); на міжнародній науково-технічній конференції "Нафтогазова енергетика: проблеми та перспективи" (м. Івано-Франківськ, 20-23 жовтня 2009 р.); на всеукраїнській науково-практичній конференції "Науково-практичний досвід – 2011" (м. Миколаїв, 17 травня 2011 р.); на міжнародній науково-технічній конференції "Нафтогазова енергетика – 2011" (м. Івано-Франківськ, 10-14 жовтня 2011 р.); на міжнародній науково-технічній конференції "Інноваційні технології буріння свердловин, видобування нафти і газу та підготовки фахівців нафтогазової галузі" (м. Івано-Франківськ, 3-6 жовтня 2012 р.).

Дисертаційна робота доповідалась й обговорювалась на наукових семінарах кафедри розробки та експлуатації нафтових і газових родовищ Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу (2009-2012 рр.).

Публікації. Основний зміст дисертації опублікований в 15 наукових працях, з яких 6 статей – у фахових виданнях (одна одноосібна), 4 патентах та тезах доповідей.

РОЗДІЛ 1

СУЧАСНИЙ СТАН ТЕХНОЛОГІЙ ТА ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ В ОБЛАСТІ
ІМПУЛЬСНО-ХВИЛЬОВИХ МЕТОДІВ ДІЇ НА ПРОДУКТИВНІ ПЛАСТИ

1.1 Класифікація хвильових технологій по типу використовуваних коливань

До перспективних та екологічно безпечних способів інтенсифікації видобутку вуглеводнів слід віднести способи, які ґрунтуються на впливі пружних коливань на нафтогазонасичені породи.

Дослідженням коливних і хвильових процесів та розробкам технічних засобів і технологій на основі їх використання присвятили роботи низка науково-дослідних установ, таких як Інститут фізики Землі РАН, ВНИИнефть, ВНИИЯГГе, РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, ІФНТУНГ, Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України, а також вітчизняні вчені Бойко В.С., Векерик В.І., Войтенко Ю.І., Зарубін Ю.О., Гошовський С.В., Гулий Г.А., Дорошенко В.М., Давиденко О.М., Єгер Д.О., Зезекало І.Г., Карпаш О.М., Кондрат Р.М., Кичигин А.Ф., Мислюк М.А., Мойсичин В.М., Михалюк А.В., Нагорний В.П., Світлицький В.М., Тарко Я.Б., Точилін Е.Л., Хоминець З.Д., Чекалюк Е.Б., Чернов Б.О., Яремійчук Р.С., Василюк Ю.М., Купер І.М., Возний В.Р., Кучернюк А.В., Бажалук Я.М., Смірнов О.П., Малюшевський П.П., Климишин Я.Д. та закордонні вчені Мирзаджанзаде А.Х., Гадиєв С.М., Сургучев М.Л., Кузнецов О.Л., Симкин Э.М., Степанова Г.С., Николаевский В.Н., Дибленко В.П., Камалов Р.Н., Попов А.А., Беляев Б.М., Чазов Г.А., Казаков В.О., Орендлихерман І.А., Чаплигин А.Г., Максименков М.О., Курленя М.В., Симонов Б.Ф., Опарин В.Н., Муфазалов Р.Ш., Климов Т.В., Зарипов Р.К., White J.E., Biot M.A., Poesio P., Ooms G., Barake S., Bas V.D.F., Venkitaraman A., Roberts P.M., Sharma M.M. [1-43].

Коливання — фізичний процес, під час якого в часі чергуються інтервали збільшення й зменшення відповідної фізичної величини.

Всі коливання по характеру взаємодії з оточуючим середовищем можна розділити на чотири типи.

1. Вільні (власні) коливання обумовлені початковим відхиленням фізичної величини від положення рівноваги.

2. Вимушені коливання обумовлені дією зовнішньої (періодичної) сили.

3. Параметричні коливання, як і вимушені, пов'язані з дією на систему зовнішньої сили. Однак параметричні коливання виникають тоді, коли дія зовнішньої сили веде до зміни параметрів системи, а не до безпосередніх відхилень фізичної величини від положення рівноваги.

4. Автоколивання — коливання, амплітуда і період яких залежать від властивостей самої системи і не залежать від початкових умов, наприклад від початкового запасу енергії. Цим автоколивання відмінні від власних і вимушених коливань.

Коливання можуть мати найрізноманітнішу природу, наприклад, механічні коливання тіл, коливання тиску, температури, сили струму, напруги тощо. Від фізичної природи виникнення, коливання розділені на такі основні групи :

- механічні;
- електромеханічні;
- електромагнітні.

В залежності від розгляду зміни стану системи в часі або з віддалю розрізняють коливання і хвильові процеси.

Механічні коливання завжди пов'язані з поперемінним перетворенням енергії однієї форми прояву в іншу. У випадку перенесення (випромінювання) енергії в середовище в ньому виникає хвильовий процес. Хвильовий процес — це міна стану середовища, що розповсюджується в ньому в часі і переносить з собою енергію.

Електромеханічні коливання бувають трьох видів: електродинамічні, що працюють з частотою коливань до 30 000 Гц, магнітострикційні - від 5000 до

100 000 Гц та п'єзоелектричні (електрострикційні) – 100 000 Гц і вище. Найбільшого поширення набули магнітострикційні генератори, принцип дії їх заснований на магнітострикційному ефекті, який полягає в періодичній зміні лінійних і об'ємних розмірів феромагнітного тіла під дією магнітного поля.

Електромагнітними коливаннями є радіохвилі, мікрохвилі, інфрачервоне випромінювання, видиме світло, ультрафіолетове випромінювання, рентгенівські промені, змінний струм. Також до електромагнітних коливань відносять коливання параметрів змінного електричного струму, коли розглядають коливання тільки електричних величин.

В залежності від частоти розрізняють інфразвуковий (менше 20 Гц), звуковий (від 20 Гц до 20 кГц), ультразвуковий (від 20 кГц до 1 ГГц) та гіперзвуковий (вище 1 ГГц) діапазони частот.

В нафтогазовій промисловості найбільш широкого застосування знайшли механічні та електромеханічні коливання в твердому, рідинному та газовому середовищах.

На рисунку 1.1 представлена класифікація хвильових технологій із використанням різних типів коливань.

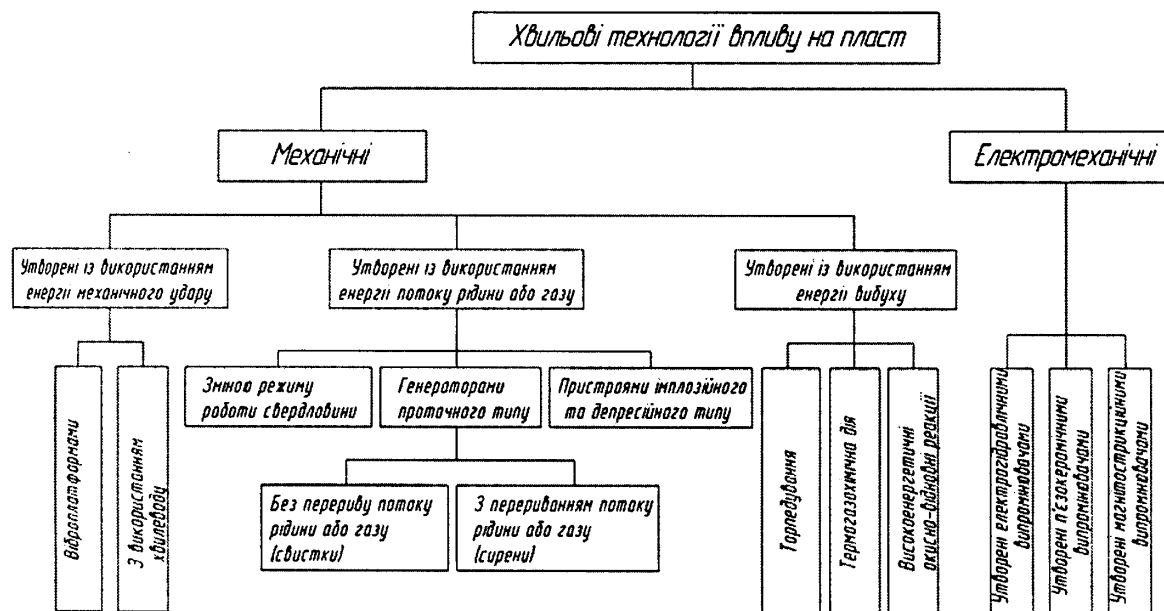


Рисунок 1.1 – Класифікація хвильових технологій із використанням різних типів коливань

1.2 Хвильові технології впливу із використанням механічних коливань

Розглянемо більш детально механічні коливання, які створюють пристрої, що використовуються в нафтогазовій області. За типом генерування їх можна розділити на такі групи:

- утворені із використанням енергії рідини або газу.
- утворені із використанням енергії механічного удару.
- утворені із використанням енергії вибуху.

Розглянемо кожен з цих груп. До першої групи належать пристрої, у яких в якості енергоносія виступає рідина або газ. Механічні коливання в цій групі можуть генеруватись гідрогазодинамічними генераторами протічного типу, імпульсними генераторами, змінами режиму роботи свердловини, пристроями для створення багаторазових миттєвих депресій та репресій тиску типу УСМД та УОС.

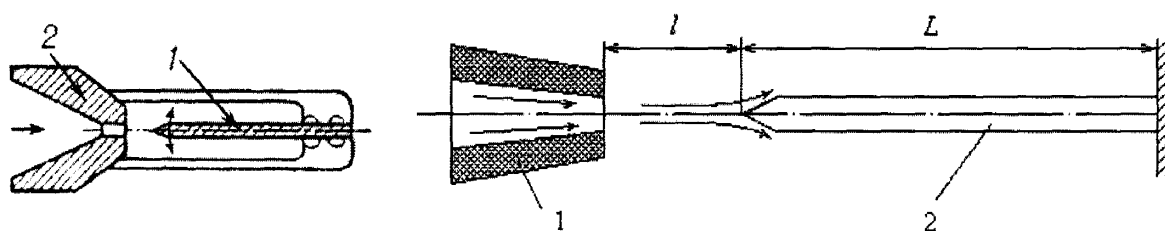
В залежності від відсутності або наявності перериву потоку рідини або газу при роботі гідрогазодинамічних генераторів протічного типу їх можна поділити на дві підгрупи.

До першої підгрупи належать акустичні випромінювачі (свистки), які перетворюють енергію струменя рідини або газу в енергію акустичних коливань. В конструкції цих акустичних випромінювачів немає рухомих частин, тому вони прості у виготовленні і зручні в експлуатації. За типом робочого тіла і середовища, для якого вони призначені, акустичні випромінювачі поділяються на газоструминні і рідинні.

Газоструминні акустичні випромінювачі, в свою чергу, поділяються на випромінювачі низького (забезпечують амплітуду зміни тиску в межах 0,01-0,2 МПа) і високого (забезпечують амплітуду зміни тиску в межах 0,5-2 МПа) тиску [44]. Акустичні випромінювачі низького тиску, як правило, мають порівняно високий коефіцієнт корисної дії, але випромінюють малу потужність, яка в середньому становить близько 1 Вт. До акустичних випромінювачів

високого тиску відносять генератор Гартмана, випромінюючою потужністю до 0,5 кВт [44,45].

Принцип дії і конструкція рідинних акустичних випромінювачів аналогічна газоструминним. Найбільш поширений тип представляє собою пластинчастий рідинний генератор, дія якого заснована на порушенні резонансних коливань пластини або стержня 1 (рисунок 1.2) струменем рідини, що витікає під тиском через сопло 2 [45]. Пластинчасті акустичні випромінювачі в залежності від геометричних розмірів пластини і пружних її властивостей генерують коливання з частотами 0,05 – 35 кГц. Випромінювання акустичних коливань при роботі пластинчастих випромінювачів здійснюється в основному за рахунок пластинки, що коливається в напрямку, перпендикулярному її площині, з максимумом поблизу її вільного кінця [46].



1 – металева пластина, 2 – сопло

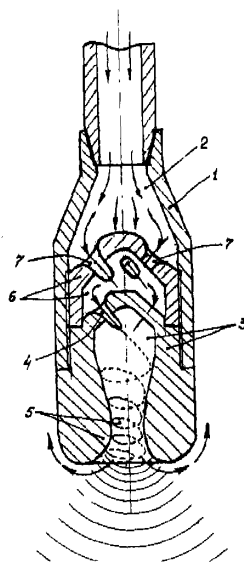
Рисунок 1.2 – Схема рідинного акустичного випромінювача

До даного типу генераторів відносять гідродинамічні пристрої розроблені в Уфимському нафтовому інституті ГАП, ГД108-УНИ [47] та розроблені науково-виробничою фірмою "Волнотех" свердловинні генератори СГГК [48].

Функціонування даних генераторів супроводжується суттєвим кавітаційним зносом як тангенційних отворів, так і поверхні вихрової камери, що веде до зміни в часі робочих параметрів генераторів та вихід з режиму їх стабільної роботи. Низька надійність, відсутність стійкості режиму та невеликий робочий діапазон витрат обмежують можливості використання подібних конструкцій.

На рисунку 1.3 показана схема рідинного акустичного випромінювача запропонована Муфазаловим Р.Ш., Климовим Т.В., та Зариповим Р.К. [49]. Конструкція цього генератора включає корпус 1 з каналом підводу робочого

агенту 2. Всередині корпуса 1 встановлена вихрова камера 3 з тангенційно-направленими вхідними каналами 4. Вихрова камера 3 має конічне звужене вихідне сопло 5. Торцева поверхня вихідного спола 5 заокруглена по радіусу. З метою зниження гідравлічних втрат та підвищення акустичного ККД вихрова камера 3 оснащена камерою 6 попереднього закручування потоку. Камера 6 має тангенційні вхідні канали 7. Тангенційні канали 4 і 7 мають однаковий обертовий напрямок. Принцип роботи пристрою полягає в наступному, робочий агент (рідина, газ або багатофазна рідина) подається по трубах НКТ у вхідний канал 2, де за тангенціально-направленими каналами 7 надходить в камеру 6 попереднього закручування. У камері 6 потік набуває певної швидкості обертання. Далі потік по тангенціально-направленим каналам 4 надходить у вихрову камеру 3. У вихровій камері 3 потік починає обертатися з більшою частотою обертання, ніж у камері 6 попереднього закручування потоку. Частота обертання в вихровій камері 3 складає $1000...1500 \text{ с}^{-1}$. При цьому у вихідному соплі 5 генеруються гідроакустичні хвилі. Гідроакустичні хвилі в привибійній зоні пласта призводять до руйнування різного роду відкладень на стінки свердловини та очищення закупорених порових каналів нафтового пласта. Депресійна дія активізує виникнення кавітації, прискорює приплив пластової нафти в свердловину.



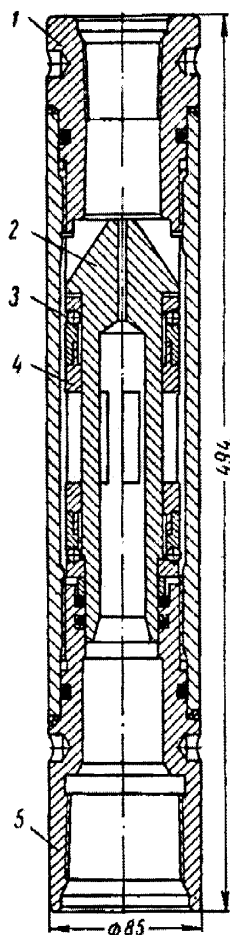
1 - корпус, 2 - канал підводу робочого агента, 3 - вихрова камера, 4,7 – тангенційно-направлені вхідні канали, 5 - вихідне сопло, 6 - камера попереднього закручування потоку

Рисунок 1.3 – Схема гідроакустичного генератора

До другої підгрупи гідрогазодинамічних генераторів протічного типу належать акустичні випромінювачі з перериванням потоку рідини або газу. Гідравлічний роторний випромінювач (сирена) – це акустичний випромінювач, дія якого заснована на періодичному перериванні потоку газу або рідини [45]. За принципом роботи роторні випромінювачі поділяються на обертові і пульсуючі. Обертові поділяються на осьові і радіальні. Відомі гідравлічні роторні випромінювачі, які працюють в частотному діапазоні від 200-300 Гц до 80-100 кГц і на частотах до 600 кГц. Потужність цих акустичних випромінювачів може досягати десятків кВт [50].

Одним з перших вибієних гідроімпульсних пристроїв був розроблений в 1964 році Гадиєвим С.М. в МИНГ і ГП генератор золотникового типу ГВЗ-85 (рисунок 1.4), який по типу відноситься до саморухомих гідравлічних роторних випромінювачів [51]. Конструкція пристрою включає корпус 2, підшипник 3, золотник 4 та нижній і верхній перехідники для з'єднання з НКТ. Принцип роботи пристрою полягає в наступному. При обертанні золотник 4 періодично перекриває отвори в корпусі 2, в результаті чого відбуваються гідравлічні удари та виникає автоколивальний процес. Рух золотника 4 складається з двох фаз. Протягом першої фази циклу золотник пропускає рідину та розганяється під дією реакції струменя, протягом другої фази канали в корпусі перекриваються і золотник рухається за інерцією та гальмує через тертя в опорах [52]. Частота пульсацій тиску подібного перетворювача визначається кількістю прорізів та лінійно залежить від витрати робочої рідини. Частота гідравлічних ударів залежить від числа щілин і оборотів золотника. Для золотникових випромінювачів типу ГВЗ частоту можна довести до 30000 ударів в хвилину. Гідравлічний удар супроводжується різким підйомом тиску, що сприяє різкому імпульсному витіканню рідини із отвору на дні. Крім того, періодичне витікання рідини із щілин при обертанні золотника створює циклічні коливання в навколишньому середовищі (рідини). Дослідження генератора показали стійку роботу на всіх робочих витратах рідини, які забезпечують існуючі промислові

насосні агрегати. Недоліки конструкції проявляються при роботі в умовах сильного забруднення та агресивного середовища, а також при циклічному режимі роботи генератора в свердловині [53].



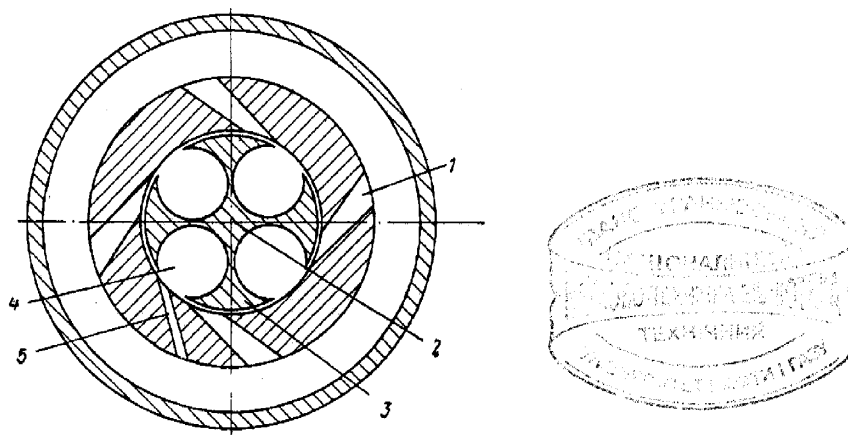
1 – верхній перехідник для з’єднання з НКТ, 2 – корпус, 3 – підшипник, 4 – золотник,
5 – нижній перехідник

Рисунок 1.4 – Золотниковий гідравлічний роторний випромінювач ГВЗ-85

Даний тип генераторів набув найбільш широкого застосування в країнах колишнього СРСР, так наприклад на підприємствах Азербайджану ефективність обробок за даними авторів склала 70-85% [54].

Ще один тип генераторів – вихровий акустичний випромінювач (рисунок 1.5). Даний тип генератора розроблений Цоком О.Е. і Климишиным Я.Д. в ІФІНГ [55] складається з циліндричної камери 1 з симетрично розміщеними тангенційними отворами. В камері розміщений ротор 2 з лопатями 3 по числу тангенційних отворів, причому міжлопатеві простори 4 мають в поперечному

січенні форму близьку до кола. Додатковий тангенційний отвір 5 слугує для запуску випромінювача. Принцип роботи пристрою наступний. При подачі робочого агента по тангенційним отворах 1 ротор починає обертатись. Окрім обертання робочого агента з частотою обертання ротора відбувається утворення завихрень в міжлопатевому просторі 4. Ці завихрення взаємодіють один з одним на виході випромінювача і в результаті цієї взаємодії утворюється додаткова компонента коливань [55]. Цей акустичний випромінювач відноситься до джерел акустичних коливань при виконанні робіт з інтенсифікації припливу.



1 - циліндрична камера із симетрично розміщеними тангенційними отворами, 2 - ротор, 3 - лопасті, 4 - міжлопатевий простір, 5 - додатковий тангенційний отвір для запуску випромінювача

Рисунок 1.5 – Поперечне січення вихрового акустичного випромінювача

Розглянемо конструкцію та технологію робіт наступного типу генераторів – генератори пружинно-клапанного та клапанно-ударного типу. До даного типу генераторів можемо віднести генератор клапанний ГК-2 конструкції БашНИПІнефть, вставний пульсатор ПВ-54 конструкції ТатНИПІнефть (рисунок 1.6), клапанно-ударний випромінювач КУВ-100 конструкції МИНГ и ГП [53]. Загальний недолік пружинно клапанних пристроїв – жорстке регламентування вузької режимної області витрат та недостатньої надійності роботи, яке обумовлене необхідністю точного узгодження жорсткості пружини та маси клапану. Невеликі зміни напірно-витратних характеристик подачі робочої

рідини, а також неминучі в ході безперервної роботи втомні зміни в конструкційних елементах (пружинах), приводять до зриву роботи.

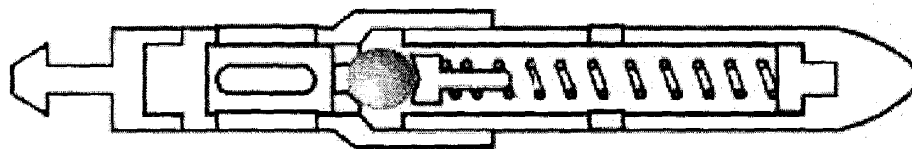
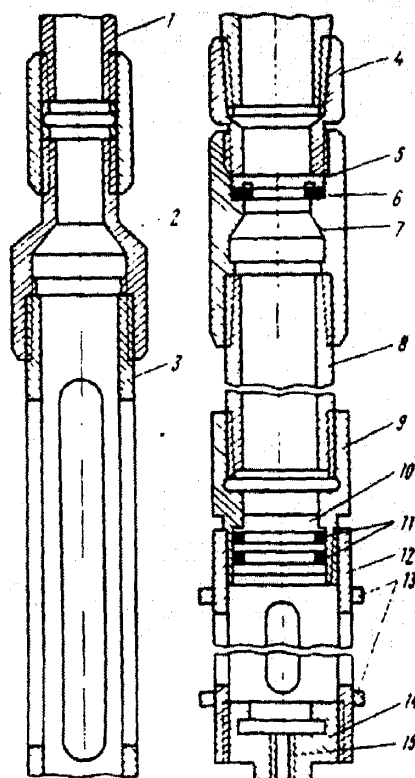


Рисунок 1.6 – Вставний пульсатор ПВ-54 конструкції ТатНИГПІнефть

Генераторами механічних коливань імпульсного типу займалися такі науковці, як Попов А.А., Склянський В.Г., Тарко Я.Б. На рисунку 1.7 зображений один з перших генераторів даного типу, розроблений інститутом Печорніпіннефть [56]. Він складається з корпусу 8 (імпульсної камери), мембрани 5, плунжера 10, направляючого патрубку 3, ніпеля 4, пастки 12, концентратора тиску 13. Пристрій спускають в свердловину на НКТ з таким розрахунком, щоб нижня його частина (середина вікон пастки 12) виявилася проти інтервалу оброблюваного пласта. Після цього затрубну засувку закривають і шляхом підвищення тиску на гирлі до 10 МПа, за рахунок закачування в свердловину робочого агента здійснюють розрив мембрани 5. Тиск розриву мембрани (на гирлі) не має перевищувати 10 МПа для запобігання порушення цілісності експлуатаційної колони.

Потім свердловинна рідина зі швидкістю 100-150 м/с заповнює імпульсну камеру 8 і виштовхує плунжер 10 в пастку 12, створюючи в оброблюваній зоні пласта (на рівні вікон пастки) гідравлічний удар з тиском, що перевищує гірський. Даний генератор використовувався для збільшення приймальності нагнітальних свердловин Усінського та Візейського родовищ республіки Комі. Успішність проведених робіт за даними авторів складає 57% при збільшенні приймальності в середньому в 1,5-2 рази [56]. Таким чином, основа методу полягає в тому, що покращення фільтраційних характеристик ПЗП та підвищення дебіту видобувних та приймальності нагнітальних свердловин досягається за рахунок використання енергії гідравлічного удару падаючого стовпа свердловинної рідини.



1 - НКТ, 2,9 - перевідники, 3 - направляючий патрубков, 4 - перехідник, 5 - мембрана-заглушка, 6 - прокладка, 7 - спецмуфта, 8 - корпус, 10 - плунжер, 11 - ущільнюючі кільця, 12 - пастка, 13 - концентратори тиску, 14 - гайка з запобіжним кільцем, 15 - отвори для крешерного приладу

Рисунок 1.7 – Генератор імплзійного типу

Для багаторазового впливу відомий гирловий генератор, розроблений Кичигиним А.Ф. та Єгерем Д.А., у якого механічний вплив здійснюється імпульсною подачею рідини в свердловину. Механічний вплив на нафтовий пласт здійснюється прикладанням до нього гідравлічних ударів, які виникають при накладанні на прямі імпульси напружень в стовпі рідини зворотних імпульсів напружень, які відбиті від вибою свердловини [57].

Окремим способом створення механічних коливань, яким займалися такі науковці, як Чекалюк Е.Б., Абдулін Ф.С., Тарко Я.Б., Кривонос І.В., є коливання тиску зумовлені зміною режиму роботи свердловини. Коливальні рухи рідини в свердловині є джерелом хвилеподібного процесу в пласті. Хвильовий стан пласта змінюється після зміни дебіту видобувної свердловини, яка виступає в

ролі збурюючої, а це призводить до змін тиску. Цей процес широко застосовується під час досліджень шляхом «гідропрослуховування пласта».

Будь-який неусталений процес зміни пластового тиску можна наближено представити сумою гармонічних хвиль тиску, які мають усталений характер. Коливання тиску в свердловині викликає в часі хвилю тиску, яка розповсюджується в глибину пласта. Джерело збурення (вибій свердловини) можна замінити сумою необмеженої кількості точкових джерел хвиль тиску, розміщених в даній поверхні, які дають однаковий сумарний ефект збуреного стану пласта. Звідси слідує, що точкове джерело хвиль є складовою частиною джерела збуреного стану пласта, а елементарна сферична хвиля, яка збурюється точковим джерелом, є складовою частиною будь-якого хвильового процесу в пластах.

Хвилі тиску в рідинах, які насичують пористе середовище, викликають також пружні деформації скелета пористого середовища, тобто гідродинамічні хвилі в пластах пов'язані з пружними хвилями аналогічними сейсмічним, які розповсюджуються по скелету пласта.

Напрямок по використанню пристроїв для створення багаторазових миттєвих депресій та репресій тиску типу УСМД та УОС займалися такі науковці, як Тарко Я.Б., Яремійчук Р.С.

Робота УСМД описана в роботі [58]. Корпус пристрою з'єднують з насосно-компресорними трубами, на яких нижче корпусу пристрою встановлюють пакер. Після спуску пристрою на необхідну глибину здійснюють посадку пакеру в експлуатаційній колоні. Для створення надлишкового тиску і розриву діафрагми в затрубному просторі нагнітають газ. У разі коли рівень свердловини рідини знаходиться на гирлі або близький до нього, надлишковий тиск можна створювати нагнітанням в затрубний простір рідини. При цьому необхідний тиск в затрубному просторі досягається практично миттєво, так як отвори в нижньої частини втулки герметично перекриваються нижнім кільцевим упором, що забезпечується створенням в затрубному просторі тиску, переданого у внутрішню порожнину втулки і притиску її до упору. Завдяки цьому, поглинання рідини з

затрубного простору пластом не відбувається і створюваний тиск повністю спрямоване на руйнування діафрагми. Після руйнування діафрагми за рахунок інерційності потоку рідини, що надходить через втулку з затрубного простору в труби, втулка переміщається у верхнє положення. При цьому відбувається зміщення отворів корпусу щодо отворів втулки і роз'єднання затрубного і трубного просторів, що запобігає перетіканню рідини з затрубного простору в труби. Одночасно відкриваються отвори в нижній частині втулки і на продуктивний пласт створюється висока миттєва депресія, під дією якої пластова рідина з продуктами забруднення через отвори надходить у "сухі" труби.

Після припинення припливу рідини з пласта, коли в НКТ знаходиться пластова рідина, швидкісний напір рідини, діючи на втулку, підтримує її у верхньому положенні, зникає і втулка під силою власної ваги займає нижнє положення, в результаті чого її отвори перекриваються упором, а отвори поєднуються з отворами корпусу. Для вилучення пластової рідини з продуктами кольматації зі свердловини проводять закачування рідини або газу в труби. При створенні надлишкового тиску в трубах отвори втулки герметично перекриваються кільцевим упором і пластова рідина з продуктами забруднення з труб через суміщені отвори втулки і отворів корпусу витісняється в затрубний простір і далі на поверхню.

Поглинання пластом свердловинної рідини суттєво впливає на процес пониження рівня. На це витрачається значна частина енергії стиснутого газу, а саме поглинання води негативно впливає на продуктивність пласта. Застосування технології та устаткування УСМД дає змогу скоротити процес пониження рівня, виключаючи при цьому насичення привибійної зони пластів водою.

Пристрій для проведення гідроударів на привибійну зону пласта на базі струминного насосу представлений в роботі [59]. Принцип роботи якого полягає в наступному.

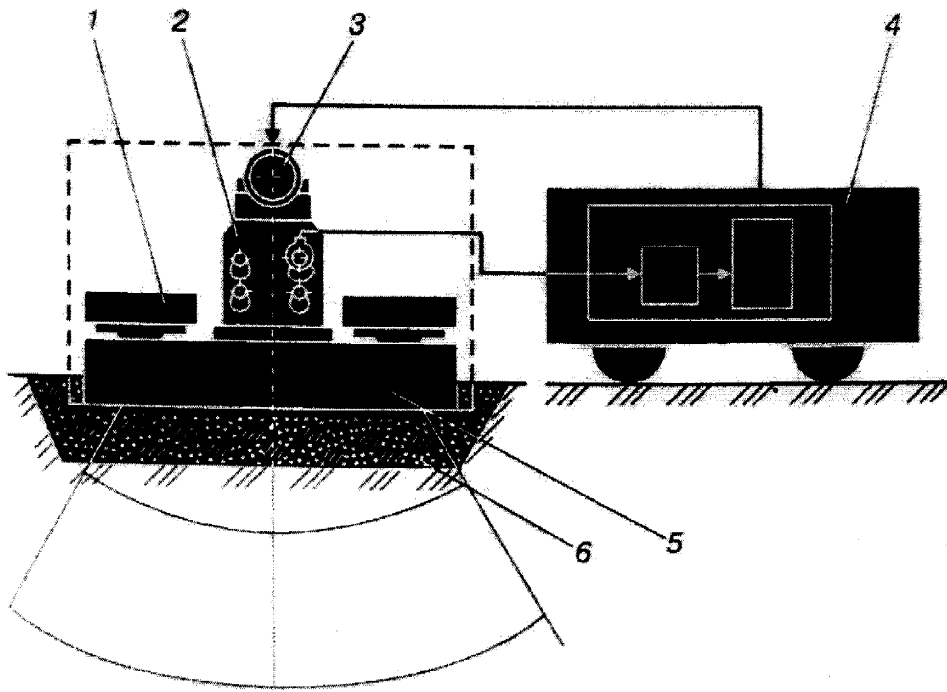
У початковий період робочі порожнини між собою роз'єднані і втулка знаходиться в крайньому верхньому положенні. При досягненні заданого тиску імпульсної обробки тиск через канали передається на кільцевий поршень, який

під впливом тиску, стискаючи пружину, рухається вниз. При досягненні положення збігу проточки із зоною розміщення кульок останні видавлюються втулкою в порожнину проточки. Це забезпечує роз'єднання втулки і корпусу. Після звільнення втулки вона під дією тиску рухається вниз, стискаючи пружину. При досягненні крайнього нижнього положення втулки відбувається поєднання радіальних вікон і радіальних каналів, що забезпечує скидання рідини з порожнини імпульсного тиску на привибійну зону.

Після вирівнювання тисків на вибої втулка під впливом пружини рухається у верхнє положення, по досягненні якого кульки входять в проточку втулки і стопорять її. Кільцевий поршень під впливом пружини також рухається у верхнє положення і виробляє замикання кулькового замку. Пристрій приводиться в початкове положення і може бути використаний повторно при управлінні насосними агрегатами.

До другої групи належать пристрої, в яких механічні коливання утворені із використанням енергії механічного удару. В залежності від способу реалізації хвильового впливу ця група поділяється на дві підгрупи відповідно з утворенням коливань на земній поверхні та утворенням коливань через свердловину.

Генерація коливань на земній поверхні висвітлена в наукових працях Курленя М.В., Симонова Б.Ф., Опарина В.Н. Джерело механічних коливань описане в їхніх роботах є віброплатформа (рисунок 1.8). Вона представляє собою платформу, яка встановлена на невелику ґрунтову основу глибиною до одного метра. На платформі монтується дебалансний віброзбудник коливань з приводом від електродвигуна постійного струму та вантажі. Керування устаткуванням здійснюється тиристорною системою.



1 - вантаж, 2 - дебалансний віброзбудник, 3 - електродвигун постійного струму,
4 - тиристорна система, 5 - платформа, 6 - ґрунтова основа

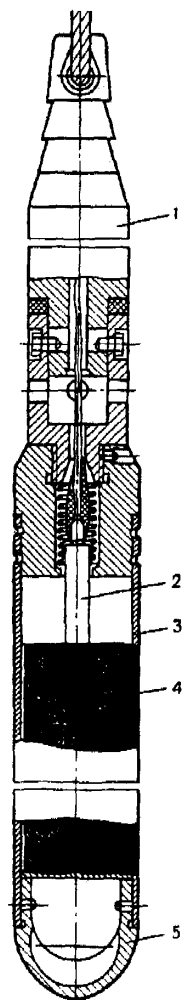
Рисунок 1.8 – Схема віброплатформи

Випробування віброплатформ проводилось на Північно-Салимському родовищі (Росія), на якому за даними авторів збільшення видобутку внаслідок дії досягало 80-150% [60]. Однак в даній статті не наведено дані по дебітах нафти, газу і води до і після хвильового впливу на пласт.

Іншим напрямом – утворенням механічних коливання із використанням механічного молоту і металевого хвилеводу займались такі науковці, як Симкин Е.М., Андрейцев С.М. Принцип дії пристрою полягає в тому, що в свердловину на вибій опускається металевий хвилевід, зверху встановлюється джерело коливань ударного типу, наприклад електромагнітний або механічний молот, який передає енергію удару хвилеводу, з наступною передачею енергії пласту. В іншому випадку в якості джерела коливань використовують станок ударно-канатного буріння. Випробування проводились на виснажених родовищах Киргизії і Башкирії, де загальний об'єм додатково видобутої нафти склав 400 тисяч тон [61]. Проте в статті не наведений коефіцієнт успішності робіт, а також не вказано на скількох свердловинах спостерігався ефект збільшення дебіту.

До останньої групи належать пристрої, які генерують механічні коливання із використанням енергії вибуху. Дана група поділяється на три підгрупи.

Перша підгрупа характеризується використанням вибухових пристроїв. Цим напрямком займалися Беляєв Б.М, Нагорний В.П., Войтенко Ю.І. [62,63]. На рисунку 1.9 зображена торпеда ТШТ, принцип дії якої полягає в створенні в інтервалі продуктивного пласта послідовних вибухів зарядів торпеди із зміщенням по фазі. Амплітудо-часові параметри вибухових хвиль вибирають з розрахунку досягнення резонансу при їх накладанні. За результатами впровадження технології на родовищах Росії та України, за даними авторів, кратність збільшення дебіту сягає 2-10 раз [64]. Однак в описі технології відсутній алгоритм вибору амплітудо-часових параметрів вибухових хвиль для досягнення резонансу, що ставить під сумнів високу ефективність даної технології.



1 - вантаж, 2 - вибуховий патрон 3 - корпус,
4 - заряд вибухової речовини, 5 - наконечник

Рисунок 1.9 – Схема торпеди ТШТ

До другої підгрупи належать технології в основі яких лежить термогазохімічний вплив на пласт, який досліджували в ПермНИПІнефти, зокрема Чазов Г.А., Мальцев Н.А. Суть ТГХВ полягає у застосуванні двох процесів повільному горінні порохових зарядів при яких збільшується тиск і температура та детонації. При ньому за даними [65] в ПЗП утворюється, як правило, одна тріщина, здатна поширюватися вглиб пласта. Якщо ж переважаючим процесом при ТГХВ є детонація, то її впливом охоплюється вся розкрита товщина шару навпроти заряду. При цьому в міру віддалення від свердловини утворюються зони ущільнення і розвантаження гірської породи і поширення тріщини [65].

До третьої підгрупи відносимо високоенергетичні окисно-відновні реакції, які викликають у пласті процеси детонації. В Україні цим напрямком активно займалась Щербина К.Г. [66,67].

Приклад реалізації вказаного впливу на пласт полягає у наступному. В область обробки свердловини, яка заповнена водою, через затрубний простір або насосно-компресорні труби закачують перший склад паливно-окисної суміші (ПОС), що являє собою суспензійний розчин у буферній рідині тетрахлоретану. При цьому положення насосно-компресорних труб значення не має. Башмак НКТ може бути встановлений на вибої або піднятий над покрівлею пласта на висоту до 370м, в останньому випадку суспензійний розчин під дією гравітаційних сил буде вільно падати на вибій.

Другий гідрореагуючий склад (ГОС) закачують у буферній рідині тетрахлоретану через затрубний простір або насосно-компресорні труби, підняті вище зони перфорації на 9 - 370м, звідки цей другий суспензійний розчин під дією гравітаційних сил також падає на вибій, з'єднуючись із першим розчином.

Роздільно-послідовна доставка в буферній рідині тетрахлорметану двох різних за складом горюче-окислювальних сумішей із ГРС і стабілізуючими домішками, дозволяє захистити ці дві паливні системи (кожний із складів ГОС - ГРС) від взаємодії з водним середовищем свердловини при закачуванні в зону

термохімічної обробки пласта. Буфер оболікає компоненти, різко знижує їхню розчинність, збільшує щільність вихідних розчинів і їхню текучість при доставці.

Використання вказаного способу і суміші для термохімічної обробки продуктивного пласта сприяє розширенню можливостей вибору свердловин із різноманітним видом порід для збільшення їх дебіту. Крім того, спосіб і суміш сприяють повноті вилучення вуглеводнів з тих свердловин, які вже віднесені до бездіючого фонду.

1.3 Хвильові технології впливу із використанням електромеханічних коливань

Розглянемо електромеханічні коливання та технології, в основу яких полягло їх використання.

Умовно цей напрямок можна розділити на 3 групи, в залежності від способу утворення коливань виділяємо: електрогідравлічний вплив, технології із використанням п'єзокерамічних та магнітострикційних випромінювачів.

Електрогідравлічним впливом на пласт займаються в Миколаївському інституті імпульсних процесів та технологій, він описаний в наукових роботах Гуля Г.А., Смірнова О.П., Малюшевського П.П., Кучернюка А.В. та інших [68-71] Сутність впливу полягає в тому, що на продуктивний пласт за рахунок формування високовольтних періодичних електричних розрядів у рідині створюють періодичні гідравлічні імпульси тиску, які супроводжуються кавітаційними ударами, що створює тріщини в пласті, руйнує і зміщує закупорювальні частинки та сприяє винесенню їх із порових каналів. Такий вплив на пласт із одночасним відбиранням рідини з пласта, за даними авторів, підвищує продуктивність свердловини в 1,5-2 рази [72].

До другої групи відносяться технології, які базуються на використанні п'єзокерамічних випромінювачів, описані в роботах Орендліхермана І.А., Чаплигіна А.Г., Максименка М.О. ЗАТ «ИНЕФ» [73]. Випромінювач являє собою електроакустичний пристрій відтворення звуку, що використовує зворотний

п'єзоелектричний ефект. Він складається з металевої пластини, на яку нанесено шар п'єзоелектричної кераміки, що має на зовнішній стороні струмопровідне напилення. Пластина та напилювання є двома контактами. Для збільшення інтенсивності звукового випромінювання до металевої пластини кріпиться невеликий металевий чи пластиковий конус з осьовим отвором. В якості конуса також може використовуватися поглиблення в корпусі пристрою, в якому використовується п'єзовипромінювач.

До третьої групи належать технології впливу на пласт із використанням магнітострикційних випромінювачів, які описані в роботах Казакова В.О., Токарева В.С., Артемьева В.М. ОАО НПП "ВНИИГИС". Магнітострикційний випромінювач представляє собою вібраційний пристрій, що складається з магнітопроводу (металевого стрижня) з обмоткою. Магнітопровід виготовляють з феромагнітних металів, різних сплавів і інших матеріалів, здатних змінювати лінійні розміри при намагнічуванні. Такими властивостями володіють нікель, залізо, кобальт, нержавіюча сталь, сплави в системах залізо-нікель, залізо-кобальт та ін. Щоб уникнути підвищення температури при роботі магнітостриктора всередині металевого стрижня залишають вузький канал, через який для його охолодження циркулює рідина. При пропусканні по обмотці змінного струму відповідної частоти виникає магнітне поле і відбувається деформація магнітопроводу по його поздовжньої осі. Утворюються ультразвукові коливання, амплітуда яких збільшується, коли випромінювач працює в умовах резонансу збуджуваних частот і власних коливань стрижня [74].

Вище проведений аналіз відомих методів утворення коливних і хвильових процесів та конструкцій пристроїв для їх отримання показали, що цей напрям є ефективний в інтенсифікації нафтогазовидобутку [75].

Реалізація цих методів і устаткування в нафтогазовидобувних свердловинах можлива на наш погляд за трьома напрямками технологій: впливу із використанням вибійних пристроїв, впливу із використанням гирлових пристроїв, впливу на пласт з земної поверхні [76-96]. Найбільшу апробацію в світовій

практиці пройшли методи хвильового впливу на привибійну зону свердловин за допомогою свердловинних гідравлічних золотникових випромінювачів.

До першого напрямку технологій відносимо всі технології, які передбачають створення коливань на вибої.

Методика використання гідравлічних генераторів, до яких належать рідинні акустичні випромінювачі, гідравлічні роторні випромінювачі, генератори золотникового типу, вихрові акустичні випромінювачі, генератори клапанного типу, вставні пульсатори, клапанно-ударні випромінювачі, полягає у:

- спуску генератора на трубах НКТ навпроти інтервалу обробки;
- створенні колової циркуляції робочої рідини агрегатом;
- обробці робочого інтервалу з паралельним слідкуванням за виносом рідини і визначенням КВЧ;
- піднятті генератора на поверхню.

Методика використання електричних генераторів передбачає обробку при працюючій свердловині і полягає у:

- спуску через лубрикатор на геофізичному кабелі, наприклад марки КГ1, п'єзокерамічного або магнітострикційного генератора коливань навпроти інтервалу обробки;
- обробці робочого інтервалу;
- піднятті генератора на поверхню.

Методика використання хімічних методів, до яких належать ТГХВ, вибухові методи та високоенергетичні окисно-відновні реакції, полягає у:

- спуску на броньованому кабелі спеціальних акумуляторів тиску, торпед або інших камер в яких відбувається фізико-хімічна взаємодія;
- обробці робочого інтервалу;
- піднятті генеруючих пристроїв на поверхню.

Методика використання гідравлічних генераторів миттєвих депресій, до яких належать імплзійні генератори, УСМД, УОС, полягає у:

- спуску генератора на трубах НКТ таким чином, щоб вікна генератора знаходились навпроти інтервалу обробки;

- пакеруванні свердловини вище інтервалу обробки;
- створення циклу миттєвих депресій на пласт;
- піднятті генеруючого пристрою на поверхню.

До другого напрямку відносимо технології, що передбачають використання гирлових пристроїв для створення коливань та передачу їх через свердловинну рідину або металевий хвилевід до вибою з подальшою дією на пласт.

Методика використання цих технологій залежить від конструктивних особливостей поверхневих генераторів, але в загальному випадку може бути описано у наступній послідовності:

- зупинка свердловини і монтаж гирлового обладнання на усті з під'єднанням до центральної або затрубної лінії;
- проведення робіт по впливу на пласт;
- демонтаж гирлового обладнання з подальшим пуском свердловини в роботу.

До третього напрямку відносимо технології, що базуються на використанні віброхвильових джерел коливань, які розташовані на поверхні землі та передають енергію через масив гірської породи.

Методика використання цих технологій полягає у:

- виборі місця встановлення віброплатформи і монтаж обладнання на земній поверхні;
- проведення робіт по впливу на масив гірської породи;
- демонтаж обладнання.

Висновки до першого розділу

Отже хвильові способи інтенсифікації видобутку вуглеводнів можна віднести до перспективних та екологічно безпечних. На основі проведеного аналізу можна зробити ряд висновків.

1. Найбільш апробованими та такими, що піддаються удосконаленню є технології, які ґрунтуються на використанні свердловинних пристроїв генерування пружних коливань завдяки енергії потоку рідини або газу.

2. В той же час цікавими та перспективними залишаються технології з використанням магнітострикційних та п'єзокерамічних генераторів, завдяки легкому регулюванню параметрів роботи цих пристроїв зміною параметрів електричного сигналу, недоліком залишається неможливість створення коливань низької частоти.

3. До недоліків технологій впливу із використанням гирлових пристроїв слід віднести розсіювання корисної роботи пристроїв по всій свердловині та вплив на вищезалігаючі непродуктивні та водоносні горизонти, тому їх використання доцільне на невеликих глибинах.

4. До недоліків технологій впливу на пласт з земної поверхні слід віднести високу вартість пристроїв та неможливість регулювання і оцінки характеру впливу на той чи інший нафтогазоносний горизонт.

5. У зв'язку із значним дефіцитом паливно-енергетичних ресурсів в Україні надзвичайно важливі і актуальні є роботи направлені на підвищення видобутку нафти і газу, шляхом вдосконалення існуючих та розроблення нових технологій впливу на привибійну і віддалену зони пласта експлуатаційних і нагнітальних свердловин.

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ І ОЦІНКА ПОШИРЕННЯ ПРУЖНИХ ХВИЛЬ І ЇХ ВПЛИВУ НА ФЛЮІДОНАСИЧЕНІ ПОРОДИ

2.1 Дослідження механізму розповсюдження пружних хвиль в насичених середовищах характерних для родовищ нафти і газу

Відомо, що в однорідному ізотропному середовищі можуть розповсюджуватись хвилі двох типів: один відповідає змінам дилатації, другий – змінам одної або декількох компонент вектора обертання [97].

Хвилі першого типу називають хвилями стиску або поздовжніми (Р-хвилі). Хвилі другого типу називають хвилями зсуву або поперечними (S-хвилі) (рисунок 2.1).

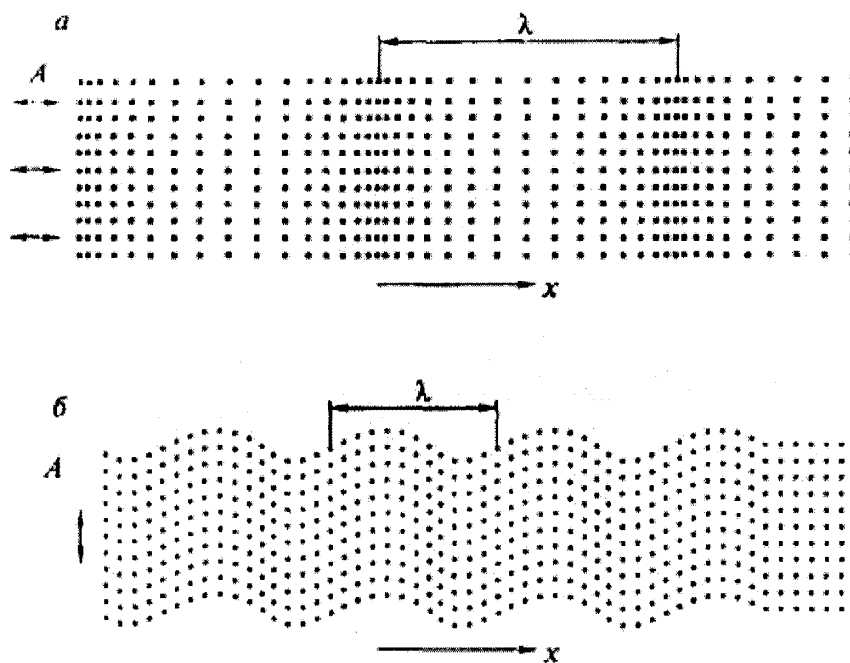


Рисунок 2.1 – Схематичне зображення а) поздовжніх та б) поперечних хвиль

Швидкості розповсюдження хвиль в гірських породах залежать від багатьох факторів, в тому числі літології, ступеня зцементованості, глибини залягання,

пористості, тиску, вмісту флюїдів [98-104]. З [105] відомо, що швидкість хвиль в флюїдонасичених осадових породах знаходиться в інтервалі від 1500 до 6500 м/с і наводиться в таблиці 2.1, вона збільшується із зменшенням пористості, збільшенням ступеня зцементованості та глибини залягання.

Таблиця 2.1 – Розповсюдження пружних хвиль в різних середовищах

Середовище	Стан	Частота, Гц	Довжина хвилі, м	Швидкість хвилі, м/с	Коефіцієнт поглинання, м ⁻¹
Кварц	Суцільна порода	50	120	6000	$4 \cdot 10^{-5}$
Пісковик (m=5%)	Водонасичений	50	80	4000	$1,2 \cdot 10^{-3}$
	Нафтонасичений	50	62	3100	$1,5 \cdot 10^{-3}$
	Сухий (газонасичений)	50	60	3000	$2 \cdot 10^{-3}$
Вода	Однорідна рідина	50	30	1500	$1,9 \cdot 10^{-11}$
Нафта	Однорідна рідина	50	28	1400	$2,8 \cdot 10^{-11}$
Повітря	Однорідний газ	50	6,62	331	$2,7 \cdot 10^{-8}$
Пісковик (m=5%)	Водонафтонасичений	20000	0,175	3500	1,6
Пісковик (k=1·10 ⁻¹³ м ²)	Водонафтонасичений	1	2,5	2,5	2,462

Розглянемо сферичну гармонічну Р-хвилю, у якої радіальне зміщення при фіксованому значенні r визначається за формулою

$$x = A \cos(\omega t + \varphi), \quad (2.1)$$

де φ – фазовий кут; A – амплітуда; ω – кутова частота; t – час; x – зміщення відносно положення рівноваги.

Враховуючи, що зміщення змінюється в часі, кожний елемент середовища має швидкість $\frac{dx}{dt}$ та пов'язану з нею кінетичною енергією. Кінетична енергія ΔE , яка міститься в кожному елементі об'єму ΔV рівна [105]:

$$\Delta E_x = (\rho \cdot \Delta V) \cdot \left(\frac{dx}{dt}\right)^2 / 2. \quad (2.2)$$

Звідси кінетична енергія на одиницю об'єму складає

$$\frac{\Delta E_k}{\Delta V} = \rho \cdot \left(\frac{dx}{dt} \right)^2 / 2 = \rho \cdot \omega^2 \cdot A^2 \cdot \sin^2(\omega t + \varphi) / 2. \quad (2.3)$$

Вираз (2.3) змінюється від нуля до максимуму, який дорівнює $\rho \cdot \omega^2 \cdot A^2 / 2$.

З пружною хвилею пов'язана також потенційна енергія, яка обумовлена пружними деформаціями, що виникають при проходженні цієї хвилі. По мірі коливання середовища енергія переходить з кінетичної в потенційну і навпаки, повна енергія залишається незмінною. Так як повна енергія рівна максимальному значенню кінетичної енергії, густина енергії E для гармонічної хвилі буде рівна [106]

$$E = \rho \cdot \omega^2 \cdot A^2 / 2 = 2\pi^2 \cdot \rho \cdot f^2 \cdot A^2. \quad (2.4)$$

Кількість енергії, яка протікає через одиничну площадку, розміщену по нормалі до напрямку розповсюдження хвилі за одиницю часу.

Для гармонічної хвилі маємо:

$$I = E \cdot c = c \cdot \rho \cdot \omega^2 \cdot A^2 / 2. \quad (2.5)$$

Геометричне розходження енергії призводить до того, що інтенсивність сферичних хвиль зменшується обернено пропорційно квадрату відстані від джерела випромінювання, для циліндричних хвиль – радіусу відстані [106,107].

При розповсюдженні пружних хвиль в гірських породах їх амплітуда внаслідок поглинання зменшується з відстанню по експоненціальному закону. Зменшення амплітуди тільки через поглинання можна записати у вигляді [107]:

$$A = A_0 e^{-\alpha x}, \quad (2.6)$$

де A, A_0 – значення амплітуди хвилі в двох точках хвильового фронту на відстані x одна від одної; α – коефіцієнт поглинання.

При розповсюдженні плоских пружних хвиль інтенсивність зменшується з віддалю за законом [108]:

$$I = I_0 e^{-2\alpha x}, \quad (2.7)$$

де I, I_0 – значення інтенсивності хвилі в двох точках хвильового фронту на відстані x одна від одної; α – коефіцієнт поглинання.

Механізм перетворення енергії пружних хвиль в тепло ще не повністю досліджений. Запропоновано різноманітні методи оцінки втрат енергії [109-113], але ні один з них в повній мірі не відповідає реальним процесам. Найбільш важливими явищами є внутрішнє тертя ковзання та в'язкі втрати при русі флюїду в порах, причому останній механізм найбільше проявляється в високопроникних породах.

Відмінності в адіабатичній стисливості твердої фази та флюїду призводить до нерівномірних термодинамічних процесів всередині пор, а відмінність в їх в'язкості та густини – до несинфазного руху скелету породи та флюїду і відповідно, в'язко-інерційному поглинанню коливань. Викликане розсіювання енергії і перетворення її в тепло може бути набагато вище загальноприйнятого ступеня поглинання [109].

Для оцінки реальних величин коефіцієнта поглинання пружних хвиль в колекторах нафти і газу доцільно використовувати сумарний коефіцієнт поглинання пружних хвиль, який можна записати у вигляді

$$\alpha = \alpha_{терм} + \alpha_{ві} + \alpha_{кс}, \quad (2.8)$$

де $\alpha_{терм}$ – коефіцієнт термічного поглинання; $\alpha_{ві}$ – коефіцієнт в'язко-інерційного поглинання; $\alpha_{кс}$ – коефіцієнт поглинання по закону Кіргоффа–Стокса.

В колекторах нафти і газу одночасно можуть розповсюджуватись хвилі трьох типів: дві поздовжні та одна поперечна [109]. Поздовжньою хвилею другого роду в колекторах нафти і газу можна знехтувати. Поздовжня хвиля першого роду – хвиля тиску, яка розповсюджується по скелету породи та флюїду. Механізм розповсюдження цієї хвилі залежить не тільки від фізичних властивостей твердої і рідкої фази, але також від ступеня гідродинамічної та термодинамічної взаємодії між ними. Термічні та в'язко-інерційні складові коефіцієнта поглинання, за однакових умов, приймають до уваги при високих частотах коливань (порядку кілька кілогерц) [109,114].

Експериментальні дані [105] дозволяють стверджувати, що коефіцієнт поглинання в гірській породі α в першому наближенні пропорційний до частоти,

тобто для конкретної породи добуток $\alpha\lambda$ – в більшості випадків постійна величина. Параметри поглинання для гірських порід наведені в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Параметри поглинання пружних хвиль для різних типів гірських порід

Тип гірської породи	$\alpha\lambda$, дБ	α/f , дБ/(км·Гц)
Магматичні породи	0,04-0,02	0,008-0,003
Осадкові породи	0,16-0,02	0,10-0,004
Газоносні породи	0,63-0,06	1,3-0,03

Формула для розрахунку коефіцієнта поглинання на вказаній частоті для поздовжніх пружних хвиль має вигляд [107]:

$$\alpha = \frac{8\pi^2 \cdot f^2 \cdot \eta}{3\rho \cdot v^3}, \quad (2.9)$$

де f – частота; η – коефіцієнт зсувної в'язкості; ρ – середня густина гірської породи; v – середня швидкість розповсюдження поздовжньої пружної хвилі в пласті.

За даними Б.Н. Боголюбова та В.Н. Лобанова [76] коефіцієнт зсувної в'язкості для водонасичених порід складає відповідно 5,05 кПа·с для щільного вапняка пористістю 1,5%, 12,64 кПа·с – для пористого вапняка пористістю 15%, 22,13 кПа·с – для щільного пісковика пористістю 20%, 69,55 кПа·с – для слабозцементованого пісковика пористістю 35% та 505,79 кПа·с – для глини пористістю 40%.

На основі приведених даних та враховуючи, що середня швидкість розповсюдження пружних хвиль в водонасиченій гірській породі густиною 2600 кг/м³ складає 4000 м/с, із використанням формули (2.9) розраховано коефіцієнти поглинання пружних хвиль в цих породах для діапазону частот від 10 Гц до 20кГц і наведені на рисунку 2.2.

Використовуючи емпіричну залежність пористості гірської породи від проникності виду $m = 10^{-2} \cdot (8,94 + 4,56 \cdot \log(k \cdot 10^{15}))$, розраховано залежності

коефіцієнта поглинання пружних хвиль від проникності на різних частотах і зображено на рисунку 2.3.

Проведемо оцінку глибини розповсюдження пружних хвиль із використанням рівняння (2.7) шляхом визначення відстані зменшення інтенсивності до 70, 50, 30, 10, 5 та 1 % від початкового значення з врахуванням коефіцієнта поглинання та геометричного розходження енергії.

Отримані залежності глибини розповсюдження від частоти пружної хвилі на різних рівнях значення I/I_0 для кожної проникності зображено на рисунках 2.4-2.8.

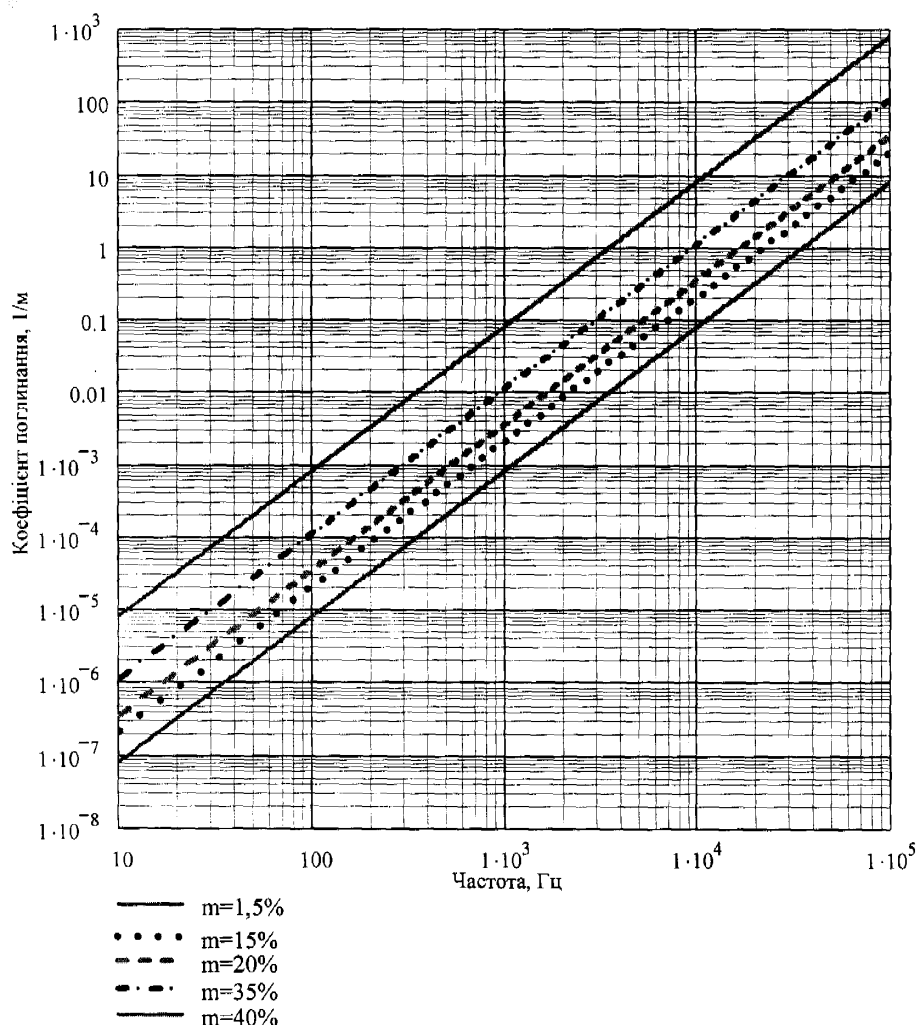


Рисунок 2.2 – Залежності коефіцієнта поглинання пружних хвиль від частоти для водонасичених порід пористістю 1,5, 15, 20, 35, 40 %

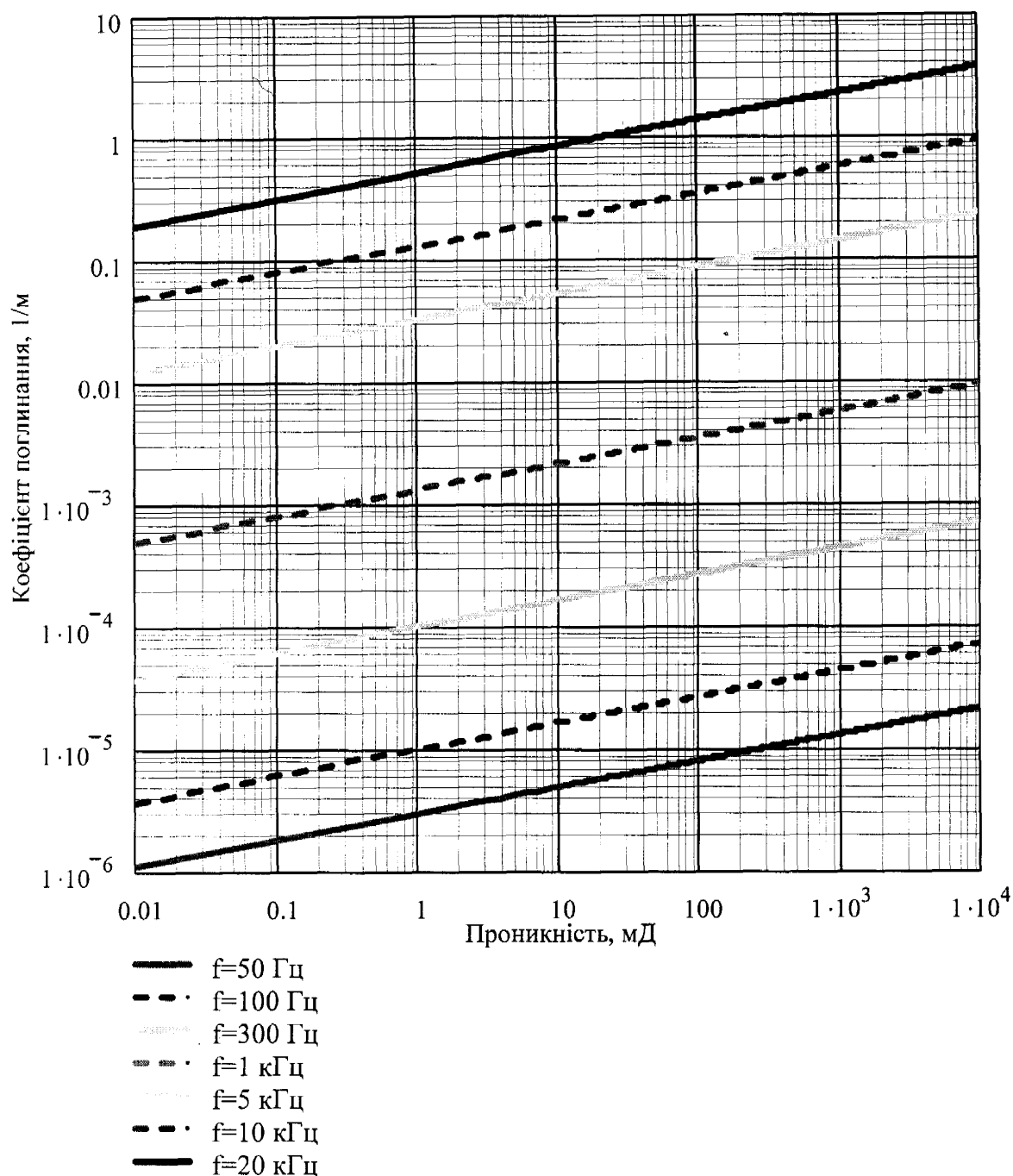


Рисунок 2.3 – Залежності коефіцієнта поглинання пружних хвиль від проникності водонасичених порід для різних частот

На основі отриманих залежностей можна зробити наступні висновки:

Для породи пористістю $m = 1,5\%$ (проникністю $0,02$ мД) інтенсивний вплив на ПЗП ($I/I_0 \geq 50\%$) необхідно здійснювати частотами 20 кГц – 14 кГц з метою оброблення на глибину від 0 до 1 м; частотами 14 кГц – 5 кГц – на глибину від 1 до $1,4$ м; частотами 5 кГц – 3 кГц на глибину від $1,4$ м до 2 м. Подальше понижен-

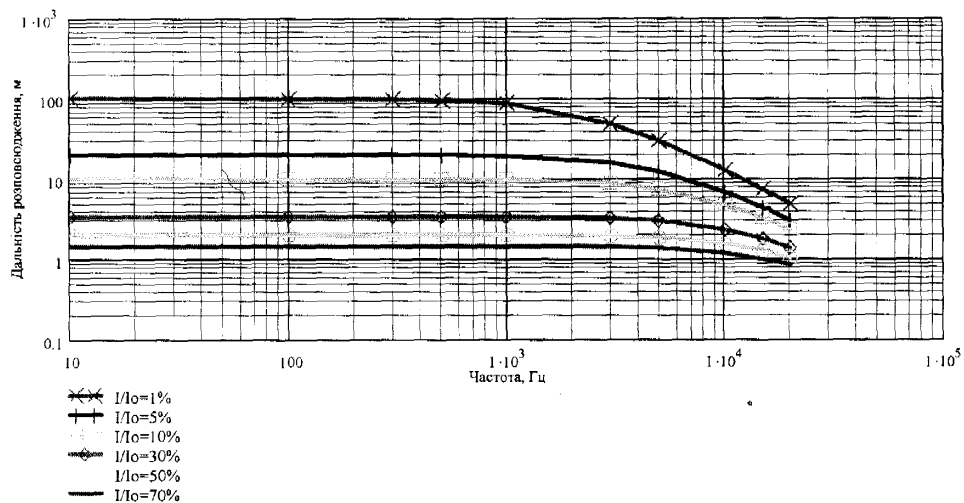


Рисунок 2.4 – Залежності глибини розповсюдження від частоти пружної хвилі для породи пористістю $m = 1,5\%$ (проникністю 0,02 мД)

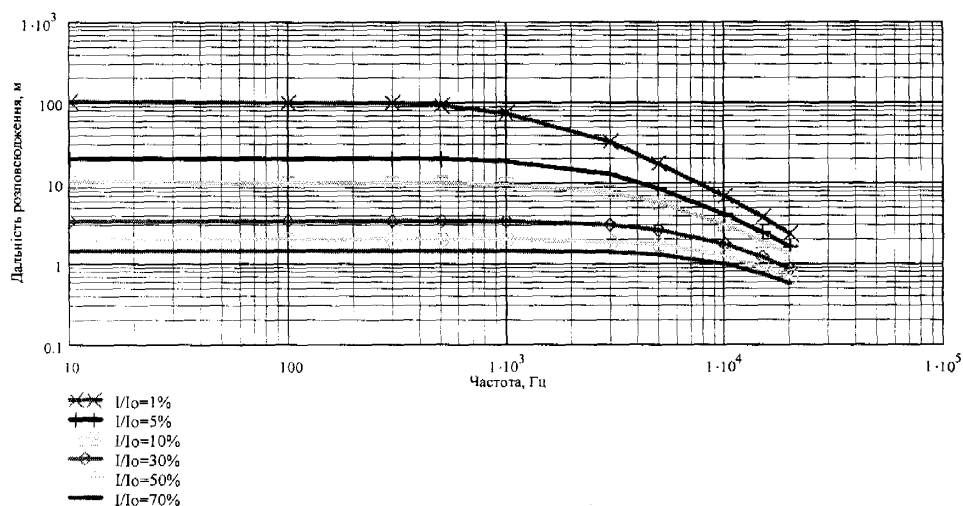


Рисунок 2.5 – Залежності глибини розповсюдження від частоти пружної хвилі для породи пористістю $m = 15\%$ (проникністю 21,33 мД)

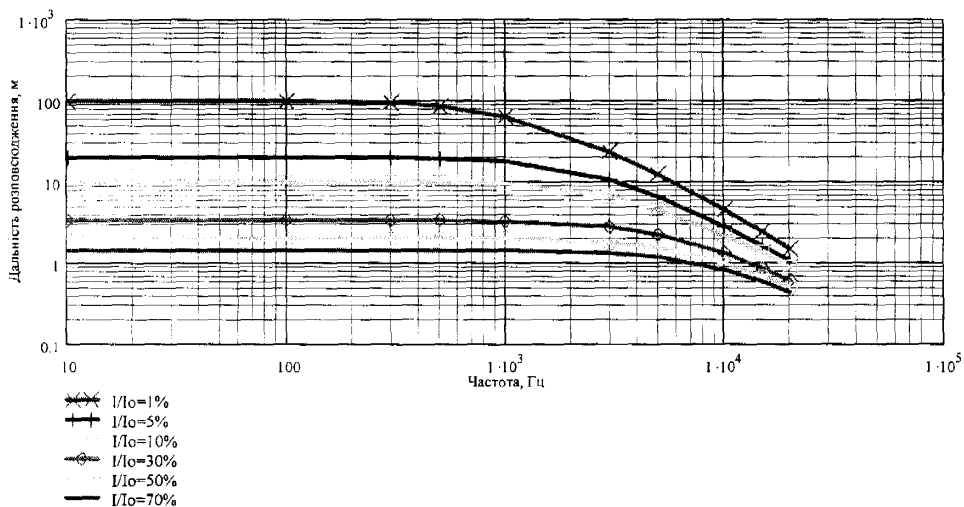


Рисунок 2.6 – Залежності глибини розповсюдження від частоти пружної хвилі для породи пористістю $m = 20\%$ (проникністю 266,34 мД)

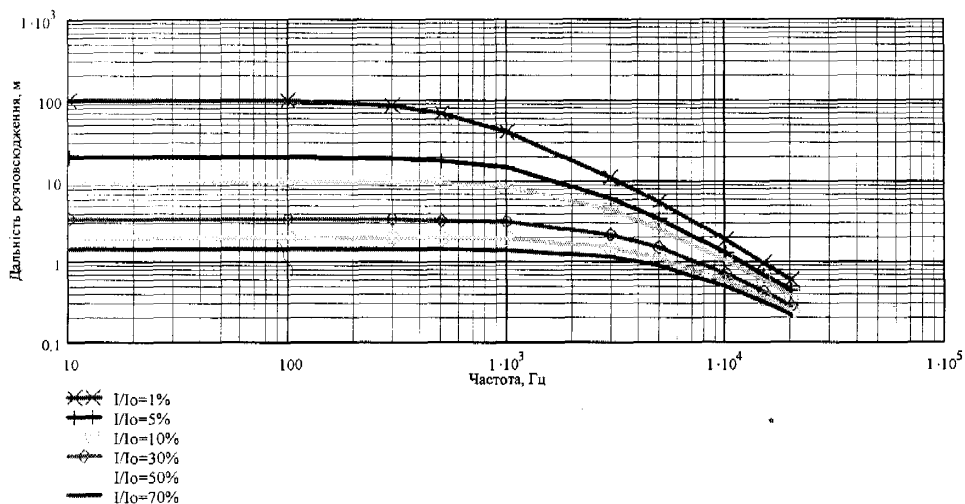


Рисунок 2.7 – Залежності глибини розповсюдження від частоти пружної хвилі для породи пористістю $m = 35\%$ (проницністю 518,69 Д)

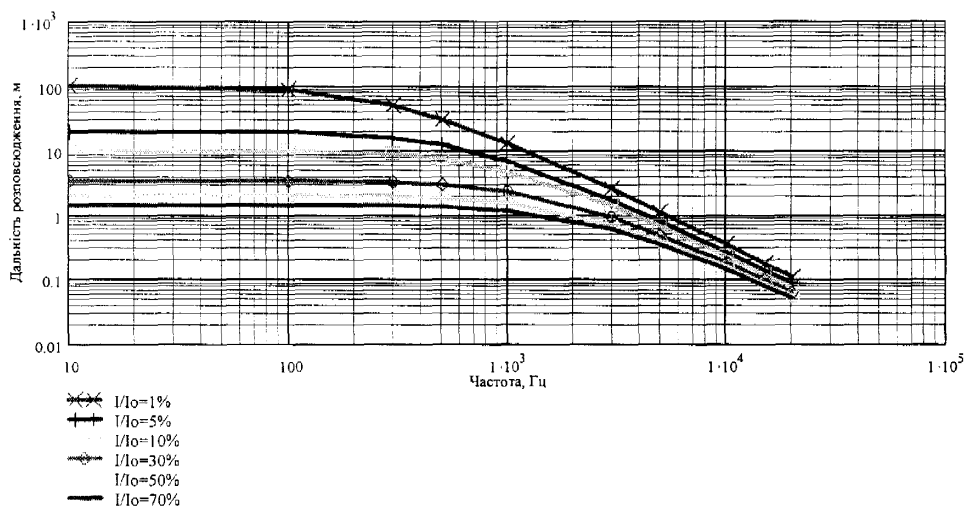


Рисунок 2.8 – Залежності глибини розповсюдження від частоти пружної хвилі для породи пористістю $m = 40\%$ (проницністю 6477,441 Д)

ня частоти не збільшує глибину оброблення ПЗП із постійним значенням I/I_0 , в той же час зростає амплітуда коливань на випромінювачі необхідна для підтримання інтенсивності на заданому рівні, що ускладнює вирішення технічних проблем випромінювачів. Вплив на віддалену зону меншою інтенсивністю ($1\% \geq I/I_0 \geq 10\%$) необхідно здійснювати частотами 20 кГц – 10 кГц з метою оброблення на глибину від 2 до 5 м; частотами 10 кГц – 2 кГц – на глибину від 5 до 10 м; частотами 2 кГц – 500 Гц на глибину від 10 м до 60 м; частотами нижче 500 Гц – на глибину до 100 м при значенні I/I_0 на рівні 1%.

Для породи пористістю $m = 15\%$ (проникністю 21,33 мД) інтенсивний вплив на ПЗП ($I/I_0 \geq 50\%$) необхідно здійснювати частотами 20 кГц – 16 кГц з метою оброблення на глибину від 0 до 0,7 м; частотами 16 кГц – 12 кГц – на глибину від 0,7 до 0,9 м; частотами 12 кГц – 8 кГц на глибину від 0,9 м до 1,1 м; частотами 8 кГц – 3 кГц на глибину від 1,1 м до 2 м. Аналогічно, як для попереднього випадку – подальше пониження частоти не збільшує глибину оброблення ПЗП. Вплив на віддалену зону меншою інтенсивністю ($1\% \geq I/I_0 \geq 10\%$) необхідно здійснювати частотами 20 кГц – 12 кГц з метою оброблення на глибину від 2 до 5,2 м; частотами 12 кГц – 5,5 кГц – на глибину від 5,2 до 15 м; частотами 5,5 кГц – 500 Гц на глибину від 15 м до 20 м; частотами нижче 500 Гц – на глибину до 100 м при значенні I/I_0 на рівні 1%.

Для породи пористістю $m = 20\%$ (проникністю 266,34 мД) інтенсивний вплив на ПЗП ($I/I_0 \geq 50\%$) необхідно здійснювати частотами 20 кГц – 17 кГц з метою оброблення на глибину від 0 до 0,5 м; частотами 17 кГц – 14 кГц – на глибину від 0,5 до 0,62 м; частотами 14 кГц – 11 кГц на глибину від 0,62 м до 0,75 м; частотами 11 кГц – 7 кГц на глибину від 0,75 м до 0,95 м; частотами 7 кГц – 3 кГц на глибину від 0,95 м до 1,3 м; частотами 3 кГц – 1 кГц на глибину від 1,3 м до 2 м. Аналогічно, як для попереднього випадку – подальше пониження частоти не збільшує глибину оброблення ПЗП. Вплив на віддалену зону меншою інтенсивністю ($1\% \geq I/I_0 \geq 10\%$) необхідно здійснювати частотами 17 кГц – 11 кГц з метою оброблення на глибину від 2 до 4 м; частотами 11 кГц – 5,5 кГц – на глибину від 4 до 10,5 м; частотами 5,5 кГц – 1 кГц на глибину від 10,5 м до 65 м; частотами нижче 1000 Гц – на глибину до 100 м при значенні I/I_0 на рівні 1%.

Для породи пористістю $m = 35\%$ (проникністю 518,69 Д) інтенсивний вплив на ПЗП ($I/I_0 \geq 50\%$) необхідно здійснювати частотами 20 кГц – 18 кГц з метою оброблення на глибину від 0 до 0,25 м; частотами 18 кГц – 16 кГц – на глибину від 0,25 до 0,3 м; частотами 16 кГц – 13 кГц на глибину від 0,3 м до 0,35 м; частотами 13 кГц – 11 кГц на глибину від 0,35 м до 0,45 м; частотами 11 кГц –

9 кГц на глибину від 0,45 м до 0,55 м; частотами 9 кГц – 7 кГц на глибину від 0,55 м до 0,65 м; частотами 7 кГц – 5,5 кГц на глибину від 0,65 м до 0,8 м; частотами 5,5 кГц – 3,8 кГц на глибину від 0,8 м до 1 м; частотами 3,8 кГц – 1,5 кГц на глибину від 1 м до 1,3 м; частотами 1,5 кГц – 1 кГц на глибину від 1,3 м до 2 м. Аналогічно, як для попереднього випадку – подальше пониження частоти не збільшує глибину оброблення ПЗП. Вплив на віддалену зону меншою інтенсивністю ($1\% \geq I/I_0 \geq 10\%$) необхідно здійснювати частотами 9,5 кГц – 6 кГц з метою оброблення на глибину від 2 до 4 м; частотами 6 кГц – 3 кГц – на глибину від 4 до 12 м; частотами 3 кГц – 300 Гц на глибину від 12 м до 85 м; частотами нижче 300 Гц – на глибину до 100 м при значенні I/I_0 на рівні 1%.

Для породи пористістю $m = 40\%$ (проникністю 6477,441 Д) інтенсивний вплив на ПЗП ($I/I_0 \geq 50\%$) необхідно здійснювати частотами 20 кГц – 16 кГц з метою оброблення на глибину від 0 до 0,08 м; частотами 16 кГц – 13 кГц на глибину від 0,08 м до 0,1 м; частотами 13 кГц – 10 кГц на глибину від 0,1 м до 0,15 м; частотами 10 кГц – 7 кГц на глибину від 0,15 м до 0,25 м; частотами 7 кГц – 5 кГц на глибину від 0,25 м до 0,4 м; частотами 5 кГц – 3 кГц на глибину від 0,4 м до 0,75 м; частотами 3 кГц – 2 кГц на глибину від 0,75 м до 1 м; частотами 2 кГц – 1,3 кГц на глибину від 1 м до 1,4 м; частотами 1,3 кГц – 500 Гц на глибину від 1,4 м до 2 м. Аналогічно, як для попереднього випадку – подальше пониження частоти не збільшує глибину оброблення ПЗП. Вплив на віддалену зону меншою інтенсивністю ($1\% \geq I/I_0 \geq 10\%$) необхідно здійснювати частотами 3,5 кГц – 2 кГц з метою оброблення на глибину від 2 до 4,8 м; частотами 2 кГц – 1 кГц – на глибину від 4,8 до 13,2 м; частотами 1 кГц – 100 Гц на глибину від 13,2 м до 90 м; частотами нижче 100 Гц – на глибину до 100 м при значенні I/I_0 на рівні 1%.

Для порівняння глибини розповсюдження від частоти пружної хвилі в залежності від пористості та проникності породи при значенні I/I_0 на рівні 1% розраховано та побудовано відповідні графічні залежності, зображені на рисунку 2.9.

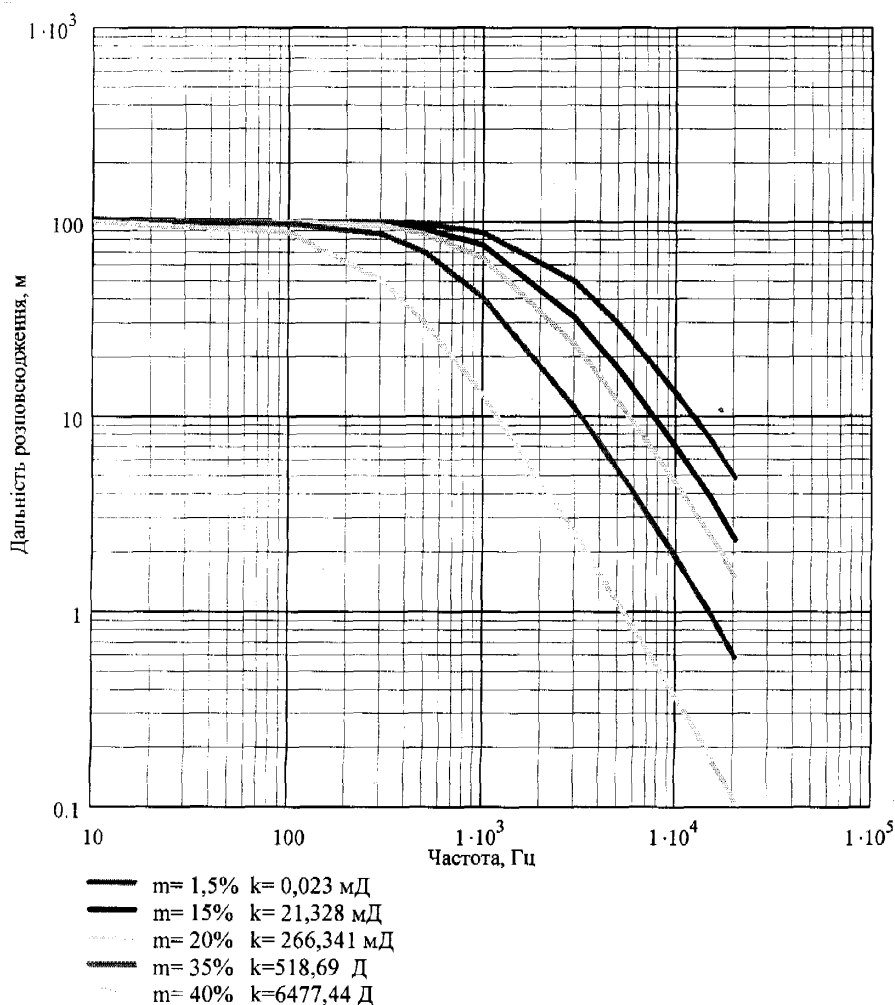


Рисунок 2.9 – Залежності глибини розповсюдження від частоти пружної хвилі для різних порід при значенні $I/I_0 = 1\%$

Проаналізувавши наведені результати було отримано кореляційні залежності частоти коливань від пористості для забезпечення на відстані від свердловини 1 м, 1,5 м та 2 м інтенсивності пружних хвиль на рівні 50% від початкової величини та зображено на рисунку 2.10.

$$f(m) = 0,0029 \cdot m^2 - 0,5662 \cdot m + 20,749 \text{ – для } R=1 \text{ м;}$$

$$f(m) = 0,003 \cdot m^2 - 0,3696 \cdot m + 11,451 \text{ – для } R=1,5 \text{ м;}$$

$$f(m) = 0,0013 \cdot m^2 - 0,1167 \cdot m + 3,1941 \text{ – для } R=2 \text{ м.}$$

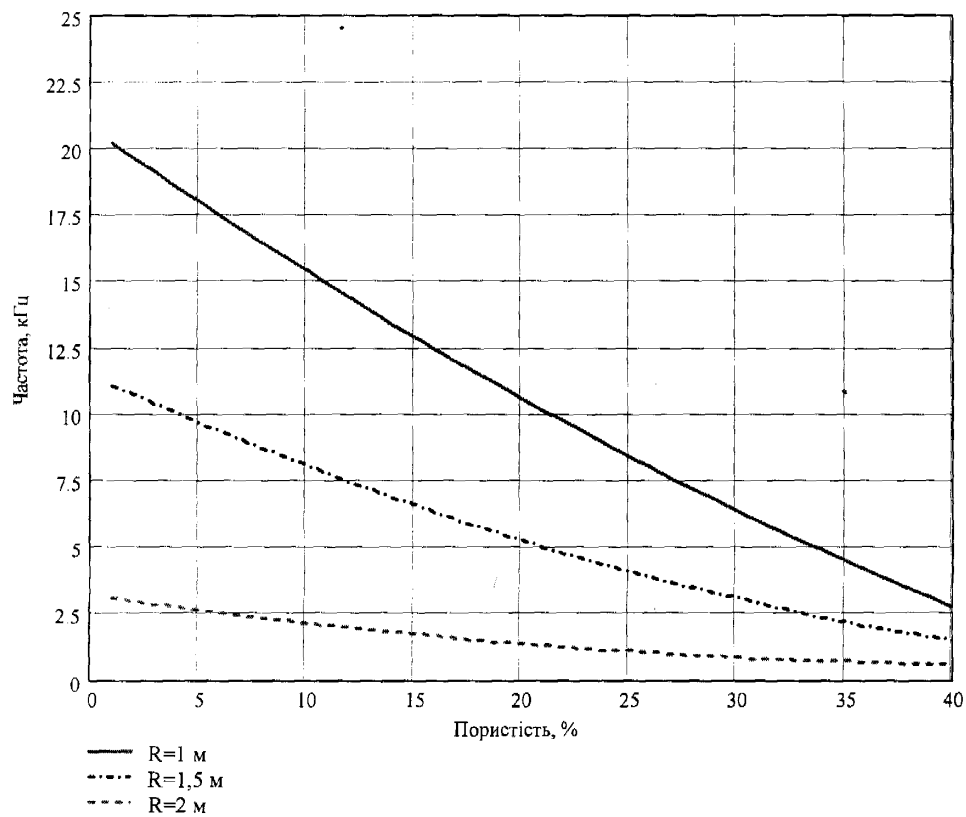


Рисунок 2.10 – Залежності частоти коливань від пористості для забезпечення на відстані від свердловини 1 м, 1,5 м та 2 м інтенсивності пружних хвиль на рівні 50% від початкової величини

Як зазначає Кузнецов О.Л. та Єфімова С.А. [92] збільшення проникності в акустичному полі спостерігається при інтенсивностях випромінювання більше 1 кВт/м^2 (рисунок 2.11), що відповідає 10% від початкової інтенсивності випромі-

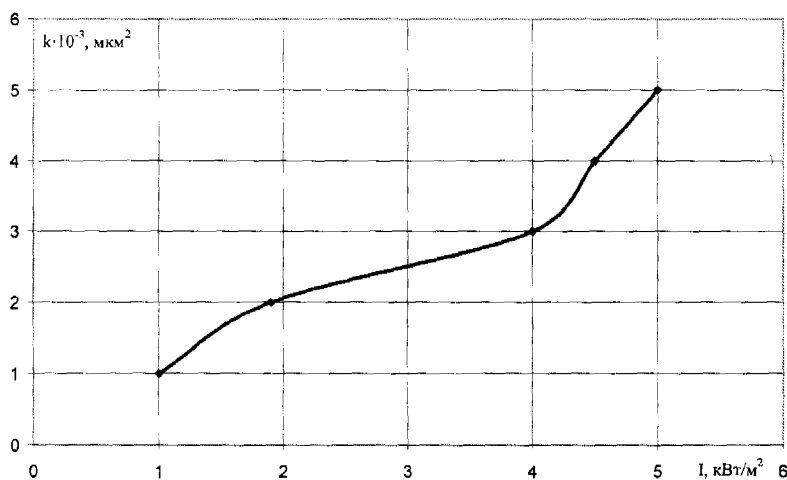


Рисунок 2.11 – Залежність проникності породи в акустичному полі від інтенсивності випромінювання (за Кузнецовим О.Л., 1983 р.)

нювання при роботі свердловинних пристроїв з $I_0 = 10$ кВт/м². Беручи до уваги їхні результати експериментів та результати теоретичних розрахунків залежності глибини розповсюдження від частоти пружної хвилі для різних порід при різних значеннях I/I_0 було отримано кореляційні залежності частоти коливань від пористості для забезпечення на відстані від свердловини 5 м, 7 м та 9 м інтенсивності пружних хвиль на рівні 10% від початкової величини та зображено на рисунку 2.12.

$$f(m) = 0,0012 \cdot m^2 - 0,251 \cdot m + 9,3523 \text{ – для } R=5 \text{ м;}$$

$$f(m) = 0,0013 \cdot m^2 - 0,1801 \cdot m + 5,7699 \text{ – для } R=7 \text{ м;}$$

$$f(m) = 0,0016 \cdot m^2 - 0,1327 \cdot m + 3,1672 \text{ – для } R=9 \text{ м.}$$

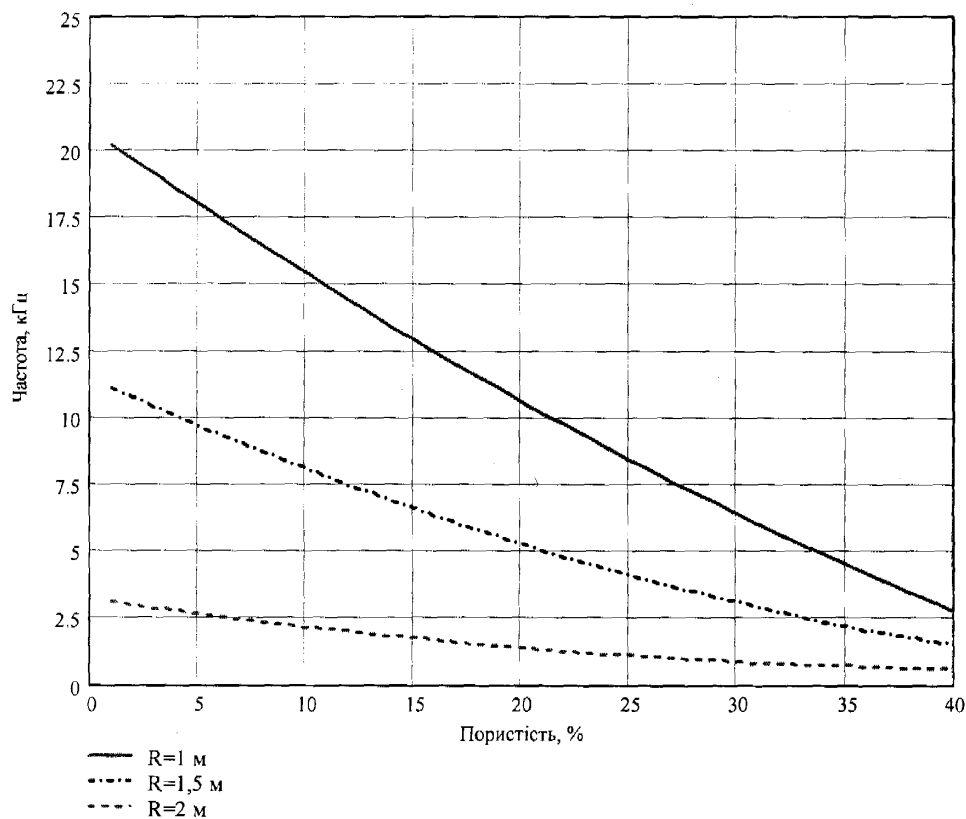


Рисунок 2.12 – Залежності частоти коливань від пористості для забезпечення на відстані від свердловини 5 м, 7 м та 9 м інтенсивності пружних хвиль на рівні 10% від початкової величини

На основі вище сказаного можна зробити висновок, що для інтенсифікації припливу флюїду, а також для впливу на нафтогазонасичені породи на віддалі

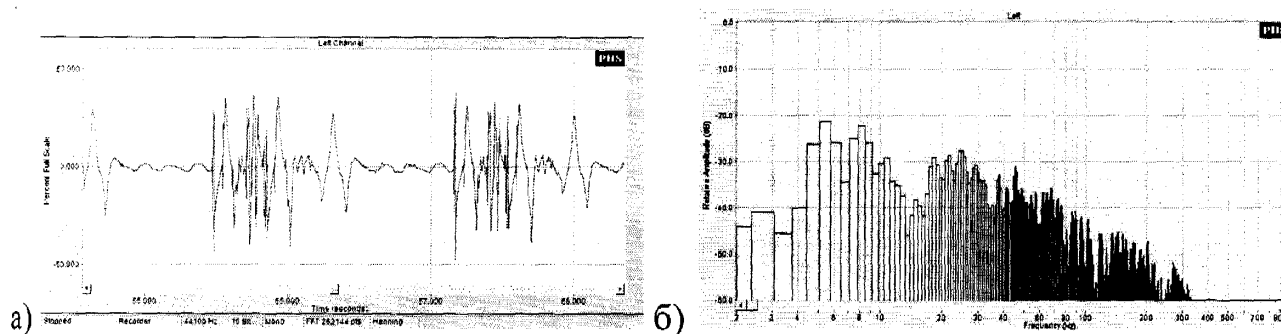
потрібно використовувати як низькочастотні та високочастотні коливання. Можливість одночасного використання такого широкого спектру частот дозволить діяти як на привибійну зону пласта (радіус порядку 2 м), так і на віддалені ділянки пласта.

2.2 Дослідження характеру розповсюдження циліндричної пружної хвилі в насиченій гірській породі

Хвильове діяння на пласт з урахуванням вказаного можливе за рахунок імпульсно-хвильового впливу. Створюваний в свердловині імпульс тиску може вміщувати набір як високочастотних так і низькочастотних гармонік. В залежності від характеру дії на пласт та поставлених завдань формуються імпульси тиску вказаної ширини та форми.

Будь-який імпульс по суті складається з певного набору гармонічних складових і може бути розкладений в тригонометричний ряд Фур'є, тобто представлений сумою гармонічних коливань.

Приклад спектрального розкладу імпульсу тиску наведений на рисунку 2.13.



а) послідовність імпульсів тиску; б) спектральний розклад послідовності

Рисунок 2.13 – Спектральний розклад імпульсу тиску

Для спрощення розглянемо випадок розповсюдження в пласті гармонічної хвилі частотою 300 Гц (рисунок 2.14) із швидкістю розповсюдження 4000 м/с, яка має вид:

$$s = A \cos(\omega t - \kappa x + \varphi), \quad (2.10)$$

де A – амплітуда зміщення; ω – кутова частота; t – час; κ – хвильове число; x – віддаль від джерела випромінювання; φ – фазовий кут.

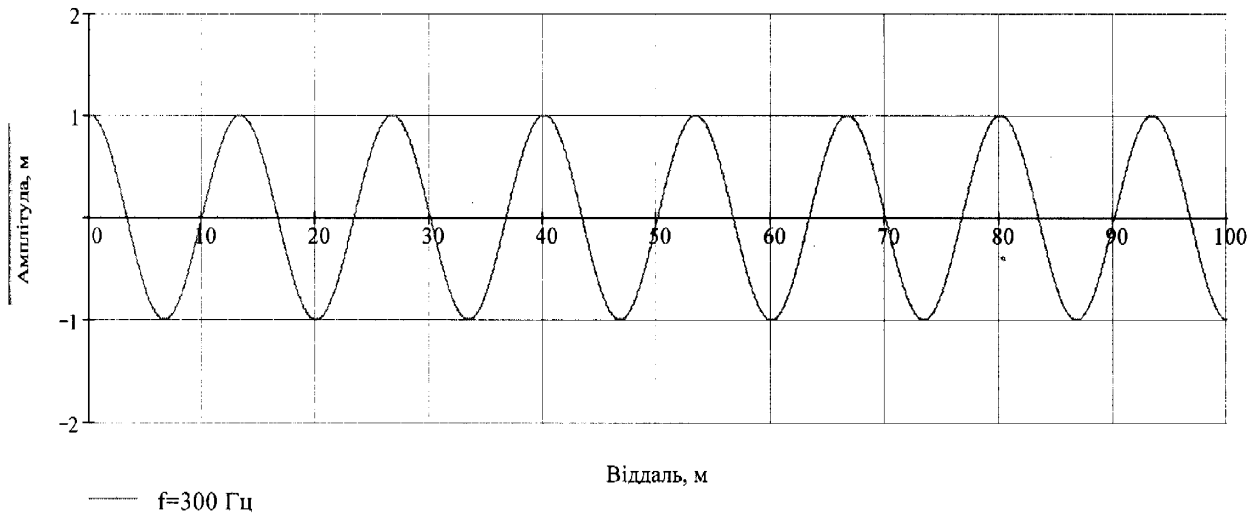


Рисунок 2.14 – Теоретичний вигляд плоскої гармонічної хвилі

Зменшення амплітуди такої хвилі внаслідок поглинання з $\alpha = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-1}$ визначається за формулою (2.6), тоді рівняння (2.10), набуде вигляду зображеного на рисунку 2.15:

$$s = A_0 e^{-\alpha x} \cos(\omega t - \kappa x + \varphi). \quad (2.11)$$

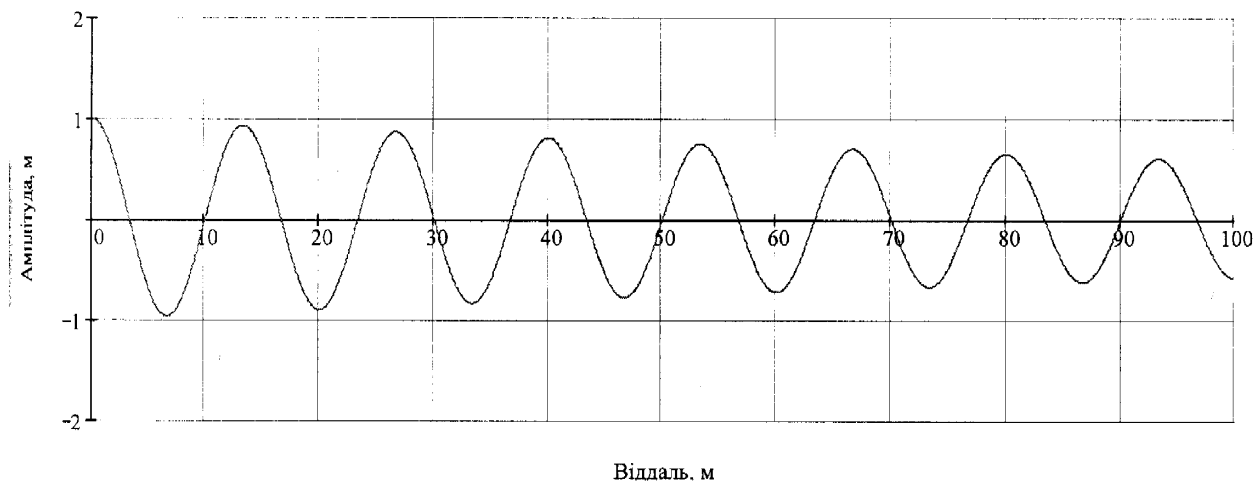
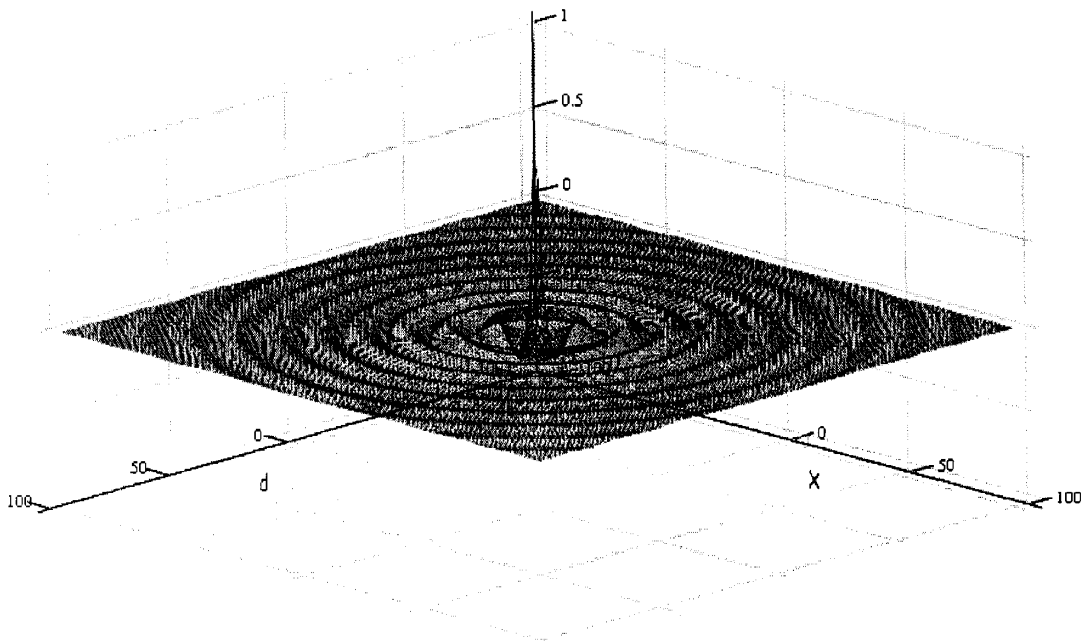
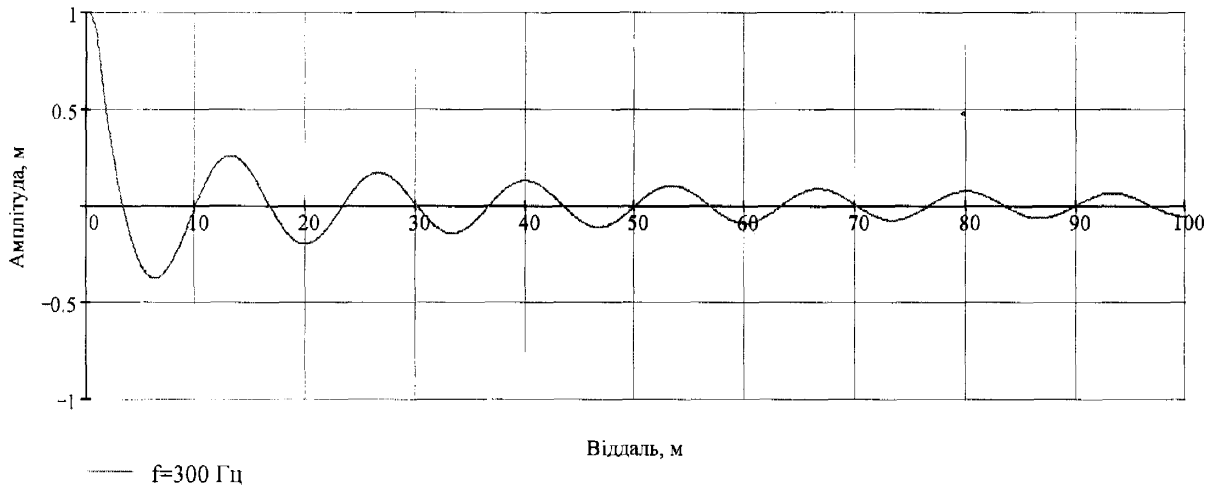


Рисунок 2.15 – Теоретичний вигляд плоскої хвилі з урахуванням поглинання

Враховуючи, що характерні розміри товщини пласта набагато менші його лінійних розмірів, приймаємо, що в пласті розповсюджується циліндрична

гармонічна хвиля у якій розсіювання енергії відбувається за рахунок геометричного розходження та поглинання і набуває вигляду (рисуюнок 2.16):

$$s = \frac{A_0}{\sqrt{x}} e^{-\alpha x} \cos(\omega t - \kappa x + \varphi). \quad (2.12)$$



а) двохвимірний вигляд б) трьохвимірний вигляд

Рисуюнок 2.16 – Теоретичний вигляд циліндричної хвилі з урахуванням поглинання

В нафтогазопромисловій практиці найпростіше оперувати такою величиною як тиск, тому, знаючи, що $P_a = \rho c \omega A_0$ [106] перетворимо рівняння зміни

амплітуди (2.12) і отримаємо рівняння розповсюдження циліндричної пружної хвилі в насиченому середовищі характерному для родовищ нафти і газу:

$$P_a = \frac{A_0}{\sqrt{x}} e^{-\alpha x} \rho c \omega \cdot \cos(\omega t - kx + \phi), \quad (2.13)$$

де P_a – амплітуда змінного тиску; A_0 – початкова амплітуда зміщення; α – коефіцієнт поглинання коливань з віддаллю; x – віддаль від джерела випромінювання; c – швидкість розповсюдження поздовжньої пружної хвилі; ρ – середня густина насиченої гірської породи (2600 кг/м^3), ω – кутова частота.

Просторове рівняння циліндричної хвилі матиме вигляд:

$$P_a = \frac{A_0}{\sqrt[4]{x^2 + y^2}} e^{-\alpha(\sqrt{x^2 + y^2})} \rho c \omega \cdot \cos(\omega t - \kappa \sqrt{x^2 + y^2} + \phi). \quad (2.14)$$

Побудована по формулі (2.13) хвиля тиску при початковій інтенсивності

$I_0 = 1 \text{ Вт/см}^2$ зображена на рисунку 2.17.

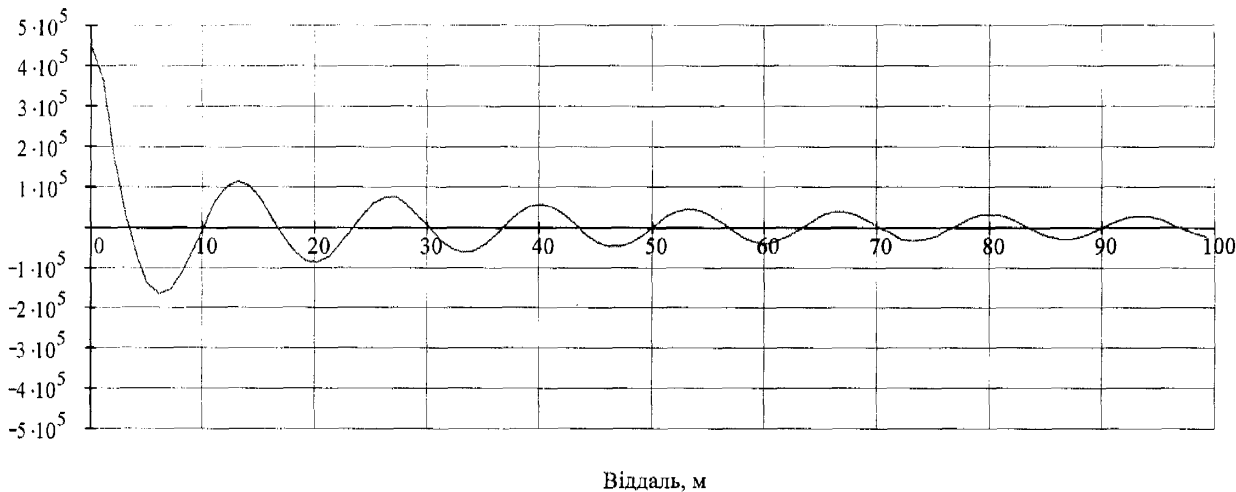


Рисунок 2.17 – Теоретичний вигляд циліндричної хвилі тиску при початковій інтенсивності $I_0 = 1 \text{ Вт/см}^2$ з урахуванням поглинання

З [106] відомо, що при розповсюдженні двох хвиль однакової частоти ($\omega_1 = \omega_2$) та фази (приймаємо $\phi = 0$) відбувається суперпозиція цих хвиль. У випадку однакових амплітуд спостерігатимемо подвоєння амплітуди результуючої хвилі:

$$s = s_1 + s_2 = \frac{A_0}{\sqrt{x}} e^{-\alpha x} \cos(\omega_1 t - \kappa_1 x) + \frac{A_0}{\sqrt{x}} e^{-\alpha x} \cos(\omega_2 t - \kappa_2 x). \quad (2.15)$$

Враховуючи, що $\kappa = \omega/c$ і $\omega = 2\pi f$ рівняння (2.15) матиме вигляд

$$s = \frac{A_0}{\sqrt{x}} e^{-\alpha x} \cos\left(\omega_1 \left(t - \frac{x}{c}\right)\right) + \frac{A_0}{\sqrt{x}} e^{-\alpha x} \cos\left(\omega_2 \left(t - \frac{x}{c}\right)\right);$$

$$s = 2 \frac{A_0}{\sqrt{x}} e^{-\alpha x} \cos\left(2\pi f_{1,2} \left(\frac{t}{360} - \frac{x}{c}\right)\right). \quad (2.16)$$

Результат суперпозиції зображений на рисунку 2.18.

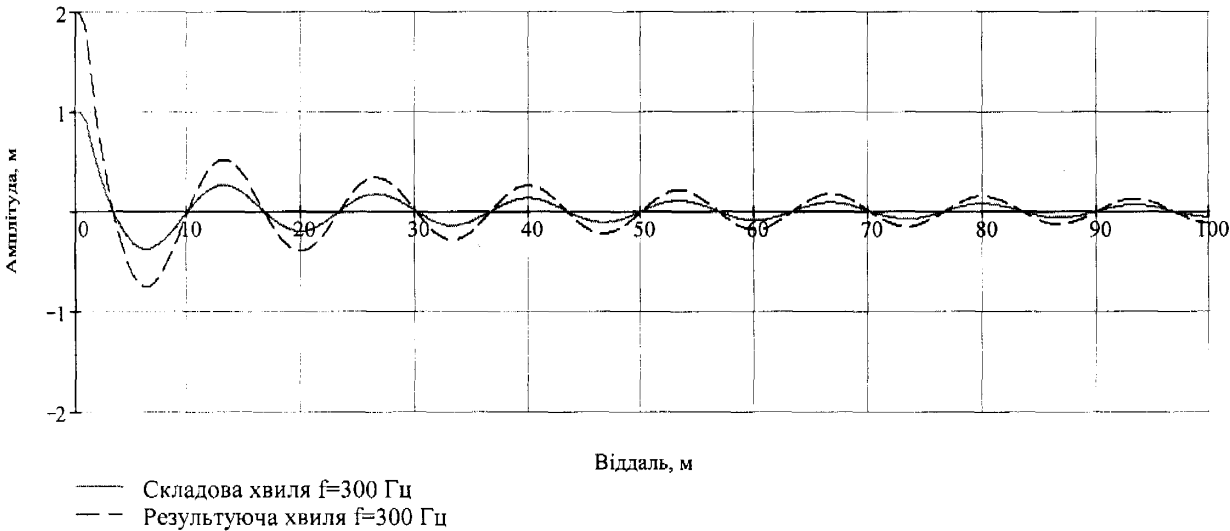


Рисунок 2.18 – Теоретичний вигляд результуючої хвилі внаслідок суперпозиції

Розглянемо випадок коли два коливання, що складаються, дуже мало відрізняються між собою по частоті, тобто $\Delta f \ll f$. Таке явище називається біттям і описується формулами:

$$s_1 = \frac{A_0}{\sqrt{x}} e^{-\alpha_1 x} \cos\left(f_1 \left(\frac{t}{360} - \frac{x}{c}\right)\right); \quad s_2 = \frac{A_0}{\sqrt{x}} e^{-\alpha_2 x} \cos\left(f_2 \left(\frac{t}{360} - \frac{x}{c}\right)\right);$$

$$s = \frac{A_0}{\sqrt{x}} e^{-\alpha_1 x} \cos\left(f_1 \left(\frac{t}{360} - \frac{x}{c}\right)\right) + \frac{A_0}{\sqrt{x}} e^{-\alpha_2 x} \cos\left(f_2 \left(\frac{t}{360} - \frac{x}{c}\right)\right).$$

Враховуючи, що частоти f_1 і f_2 дуже мало відрізняються між собою, для спрощення приймаємо, що $\alpha_1 \approx \alpha_2$, тоді отримуємо результуюче рівняння суперпозиції хвиль:

$$s = \frac{2A_0}{\sqrt{x}} e^{-\alpha_1 x} \cdot \cos\left(\pi(f_2 - f_1)\left(\frac{t}{360} - \frac{x}{c}\right)\right) \cdot \cos\left(\pi(f_1 + f_2)\left(\frac{t}{360} - \frac{x}{c}\right)\right). \quad (2.17)$$

Для виконання умови $\Delta f \ll f$, приймаємо, що частота f_2 на 5% більше частоти f_1 , тобто $f_2 = 1,05 \cdot f_1$. Приклад складання хвиль з різними частотами (рисунок 2.19), при відсутності та наявності втрат енергії зображений на рисунку 2.20.

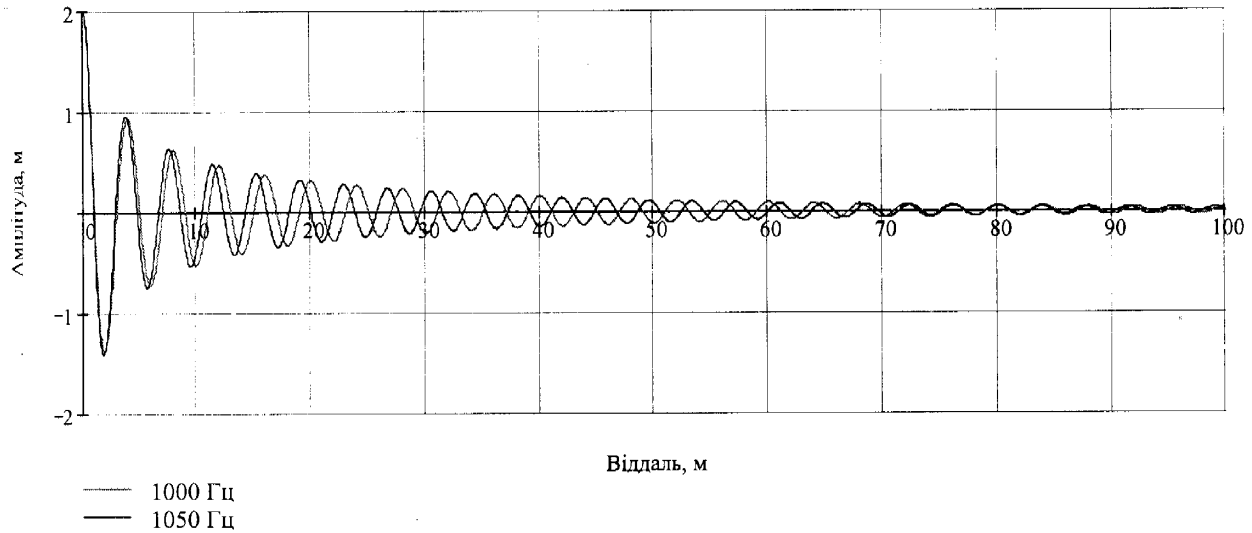


Рисунок 2.19 – Теоретичний вигляд двох циліндричних хвиль при $f_1 = 1000$ Гц і $f_2 = 1050$ Гц

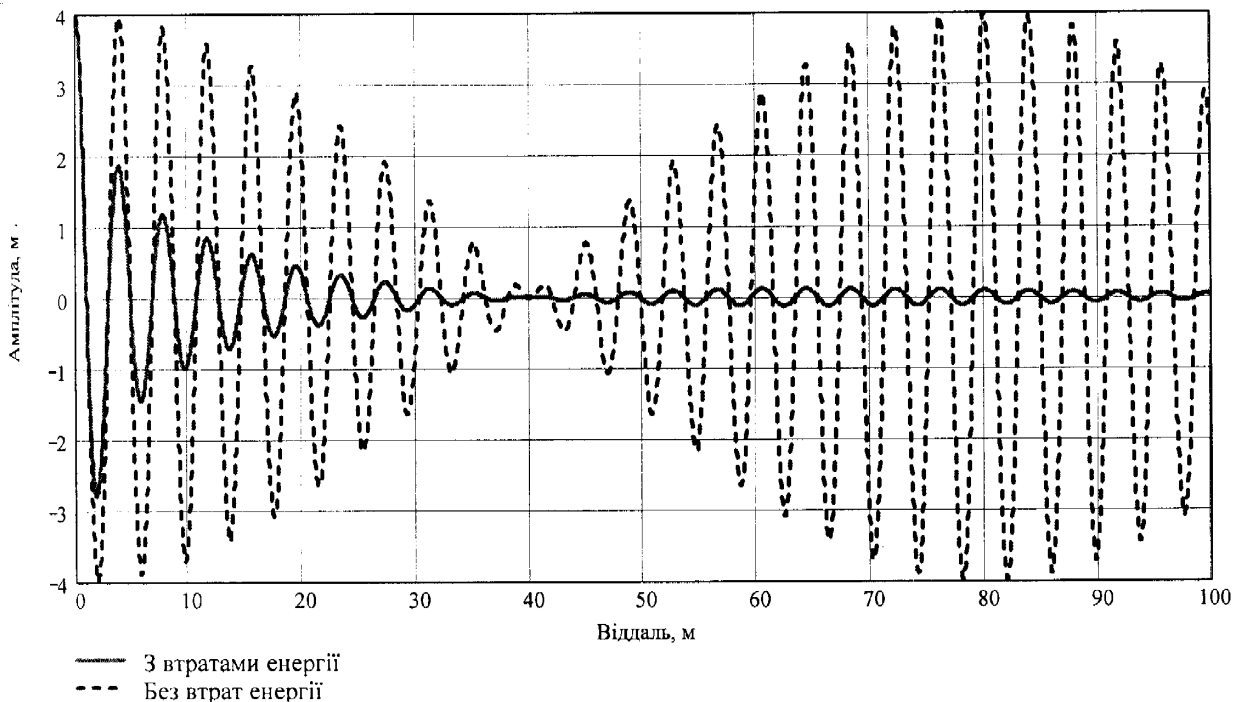


Рисунок 2.20 – Теоретичний вигляд суперпозиції хвиль з різними частотами при виконанні умови $\Delta f = 5\%$

За даними Тимошенко В.І. [115], внаслідок розповсюдження в середовищі двох хвиль з близькими частотами, в цьому середовищі виникає хвиля різницевої частоти $\Delta f = f_2 - f_1$, яка в силу малості поглинання на низьких частотах розповсюджується на великі відстані і може бути записана у вигляді наступного рівняння:

$$s_{\Delta f} = \frac{2A'_0}{\sqrt{x}} e^{-\alpha_{\Delta f} x} \cdot \cos\left(\pi \Delta f \left(\frac{t}{360} - \frac{x}{c}\right)\right), \quad (2.18)$$

де $\alpha_{\Delta f}$ – коефіцієнт поглинання для частоти Δf , A'_0 – амплітуда зміщення від високочастотних складових.

Отже можна зробити висновок, що внаслідок створення на вході в пласт імпульсів тиску певної форми, в пласті маємо розповсюдження високочастотних та низькочастотних складових імпульсу, а також хвилі різницевої частоти високочастотних складових.

Для підтвердження можливості утворення різницевої частоти в розділі 3 буде розглянута фізична модель насиченого пористого середовища із одночасним створенням в ньому коливань двох частот.

Розглянемо випадок, коли генерування коливань відбувається в різних точках, тоді сумарна хвиля буде залежати як від віддалі до джерел, так і від відстані між ними. Позначимо відстань між джерелами $2d$ і зобразимо схему поширення хвиль на рисунку 2.21.

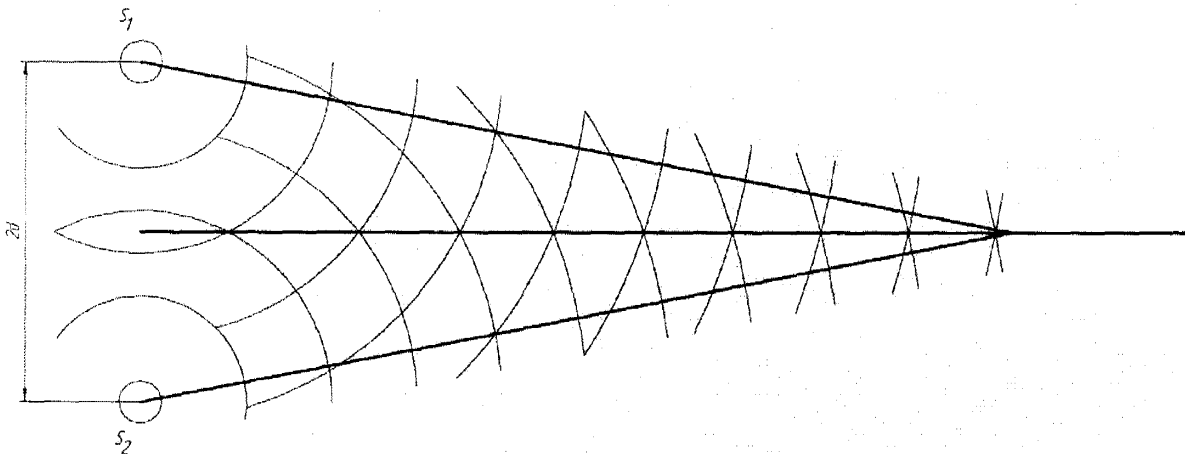


Рисунок 2.21 – Схема поширення хвиль від двох джерел випромінювання

Враховуючи наявність віддалі між джерелами, рівняння (2.16) набуде вигляду:

$$s = 2 \frac{A_0}{\sqrt[4]{d^2 + x^2}} e^{-\alpha \sqrt{d^2 + x^2}} \cos \left(2\pi f_{1,2} \left(\frac{t}{360} - \frac{\sqrt{d^2 + x^2}}{c} \right) \right). \quad (2.19)$$

Для випадку $\Delta f \ll f$ новоутворена хвиля буде описуватись рівнянням:

$$s = \frac{2A_0 e^{-\alpha_1 \sqrt{d^2 + x^2}}}{\sqrt[4]{d^2 + x^2}} \cdot \cos \left(\pi (f_1 - f_2) \left(\frac{t}{360} - \frac{\sqrt{d^2 + x^2}}{c} \right) \right) \times \\ \times \cos \left(\pi (f_1 + f_2) \left(\frac{t}{360} - \frac{\sqrt{d^2 + x^2}}{c} \right) \right). \quad (2.20)$$

Проаналізуємо, які переваги і недоліки виникають при наявності відстані між джерелами. До переваг можемо віднести збільшення площі оброблення по товщині продуктивного пласта, в той же час із збільшенням відстані між джерелами амплітуда новоутвореної різницевої низькочастотної хвилі різко зменшується, що призводить до зменшення так званої ефективної глибини оброблення.

Підсумовуючи вищевказане виникає потреба у визначенні максимальної та оптимальної відстані між джерелами коливань. Варто зазначити, що для кожної частоти ці відстані будуть відрізнятись, за рахунок більшого поглинання на високих частотах.

Для прикладу розглядатимемо два джерела випромінювання з частотами відповідно $f_1 = 20 \text{кГц}$ і $f_2 = 1.05 \cdot f_1 = 21 \text{кГц}$.

Проведемо оцінку максимального значення відстані між джерелами генерування коливань при якому буде відбуватися явище биття. Умовою для цього приймаємо, що амплітуда коливань від кожного випромінювача повинна становити не менше 10% від її початкового значення. Провівши обрахунки в програмі MathCAD для обраних нами частот половина відстані між випромінювачами складатиме 1,35 м. На рисунку 2.22 зображене 3-х вимірне поле створене високочастотними коливаннями 20кГц і 21 кГц (темного кольору) та

новоутвореною різницевою хвилею 1 кГц (світлого кольору) для обрахованого значення d .

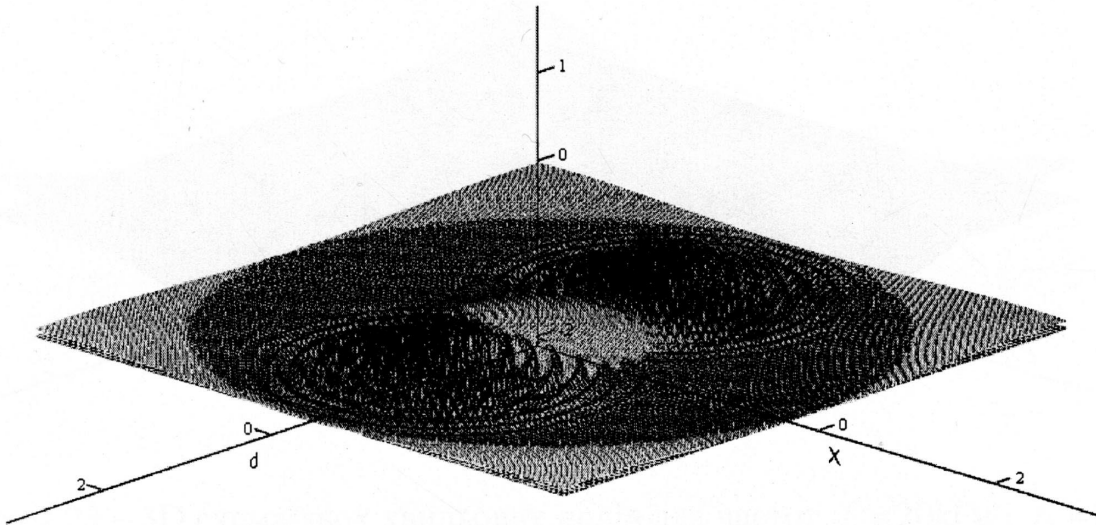


Рисунок 2.22 – 3D схема двох хвильових полів для частот $f_1 = 20\text{кГц}$ і $f_2 = 21\text{кГц}$ при значенні $d = 1,35\text{ м}$

Для визначення оптимальної відстані між випромінювачами приймаємо умову, згідно якої амплітуда коливань від кожного випромінювача повинна становити 50% від її початкового значення, що дозволить внаслідок подвоєння амплітуди при роботі двох джерел отримати амплітуду низькочастотної різницевої хвилі на рівні 100% і в той же час збільшити площу оброблення по товщині пласта в порівнянні з нульовою розходженістю джерел.

Аналогічно, як для максимального значення, отримуємо оптимальне значення половини відстані між випромінювачами на рівні 0,43 м та будуємо 3-х вимірне поле (рисунок 2.23).

Аналогічно, як для частот $f_1 = 20\text{кГц}$ і $f_2 = 21\text{кГц}$ встановимо і побудуємо на рисунку 2.24 залежність між оптимальною та максимальною відстанню між випромінювачами та частотою випромінювання f_1 .

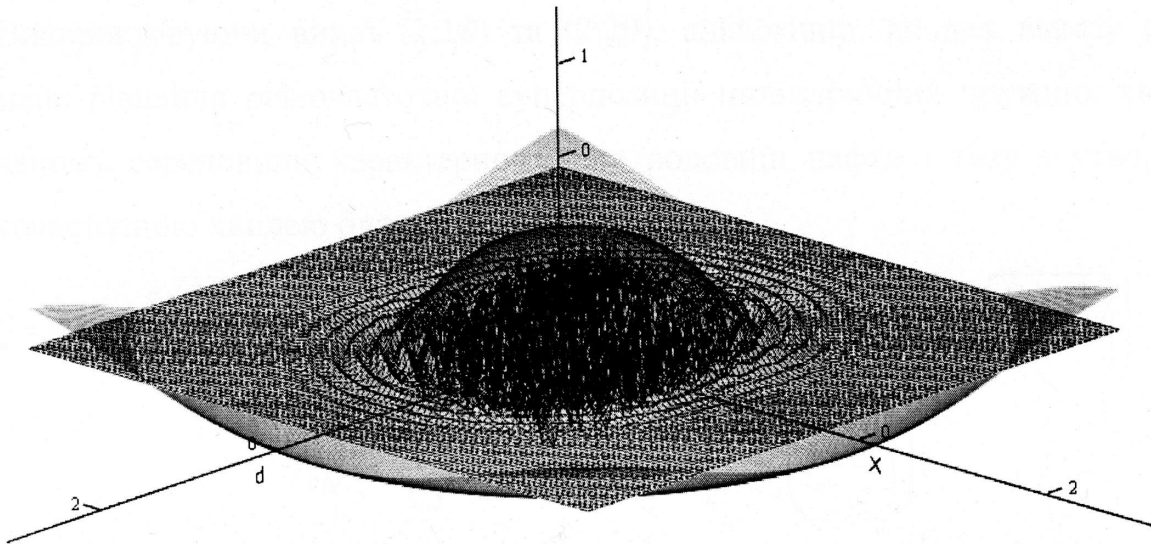


Рисунок 2.23 – 3D схема двох хвильових полів для частот $f_1 = 20\text{кГц}$ і $f_2 = 21\text{кГц}$ при значенні $d = 0,43\text{ м}$

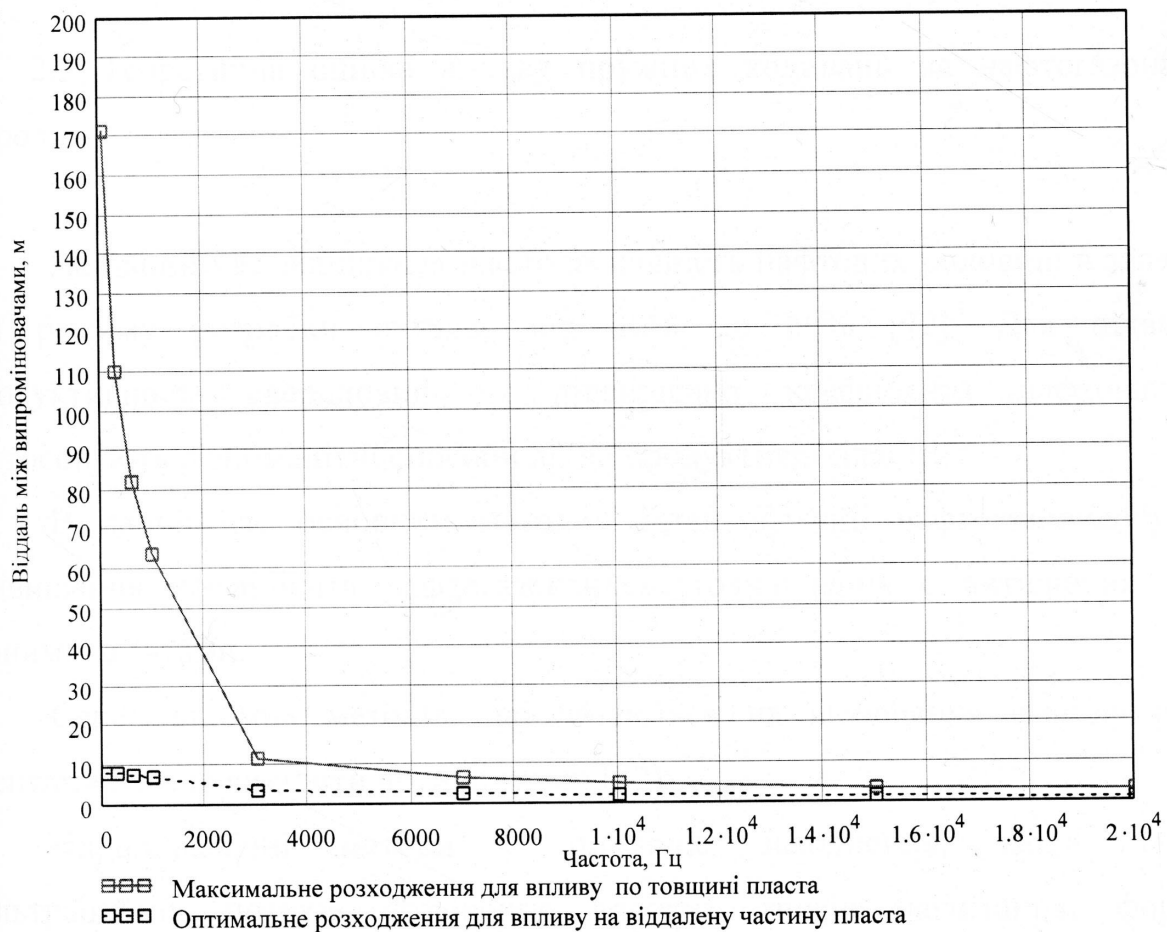


Рисунок 2.24 – Залежність між оптимальною та максимальною відстанню між випромінювачами та частотою випромінювання

Використовуючи вираз (2.18) та (2.20), аналогічно, як для виразу (2.13), отримане рівняння різночастотної суперпозиції циліндричних пружних хвиль в насиченому середовищі характерному для родовищ нафти і газу з утвореною низькочастотною хвилею биття матиме вигляд:

$$P_a = \frac{4\pi A_0 e^{-\alpha_1 \sqrt{d^2+x^2}}}{\sqrt[4]{d^2+x^2}} \rho c f_1 \cdot \cos\left(\pi \Delta f \left(t - \frac{\sqrt{d^2+x^2}}{c}\right)\right) \cdot \cos\left(\pi (f_1 + f_2) \left(t - \frac{\sqrt{d^2+x^2}}{c}\right)\right); \quad (2.21)$$

$$P_{a\Delta f} = \frac{4\pi A'_0}{\sqrt{x}} e^{-\alpha_{\Delta f} x} \rho c \Delta f \cdot \cos\left(\pi \Delta f \left(t - \frac{x}{c}\right)\right). \quad (2.22)$$

Порівнюючи отримані вирази з існуючою рівнянням розповсюдження пружної хвилі, бачимо, що отримане рівняння враховує: результат суперпозиції хвиль від різночастотних джерел, наявність розходження між цими джерелами та утворення низькочастотної різницевої хвилі биття.

2.3 Теоретична оцінка впливу пружних коливань на нафтогазонасичені породи

На даний час залишкова нафтонасиченість нафтових родовищ в залежності від режиму розробки складає від 20% до 60% [72]. Для підвищення продуктивності свердловин та підвищення коефіцієнта нафтовилучення застосовують різноманітні способи дії на продуктивні пласти.

В даний час основним методом інтенсифікації нафтогазовидобутку та підвищення коефіцієнта нафтогазоконденсатовилучення є витіснення флюїду різними агентами.

Серед відомих методів, що базуються на витіснення флюїду різними агентами можна виділити чотири групи [72]:

гідродинамічні методи – циклічне заводнення, зміна напрямку фільтраційних потоків, створення високих тисків нагнітання, форсоване відбирання рідини;

фізико-хімічні методи – заводнення із застосуванням активних домішок (ПАР, полімерів, лугів, сірчаної кислоти, діоксиду вуглецю, міцелярних розчинів);

газові методи – водогазове циклічне діяння, витіснення нафти газом високого тиску;

теплові методи – витіснення нафти продуктами горіння, внутрішньо пластове горіння, використання води як терморозчинника нафти.

Як вже було сказано в першому розділі одним з нових способів дії на пласт, що відрізняється економічністю та екологічністю використання є технологія хвильового впливу на нафтогазонасичені породи.

В залежності від частотного спектру, інтенсивності коливань, акустичного опору середовища в пластових умовах можуть відбуватись такі ефекти і явища:

- ефект зміни капілярного тиску на межі поділу нафта-вода;
- ефект розгазування нафти за умови тиску середовища близького до тиску насичення нафти газом;
- руйнування колоїдно-дисперсних систем (КДС) та очищення від кольматанту привибійної зони пласта (ПЗП);
- ефект додаткового градієнту тиску.

2.3.1 Оцінка ефекту зміни капілярного тиску на межі поділу нафта-вода внаслідок хвильової дії

В наш час нагнітання води здійснюється на 28% вітчизняних родовищ [72]. Розглянемо модель гіпотетичного покладу з наявною системою підтримання пластового тиску або з природнім пружньоводонапірним режимом з додатковими припущеннями:

- поклад є літологічно необмежений;
- обводненість свердловин порядку 80-90%;
- поклад розробляється в усталеному водонапірному режимі при певному значенні контурного тиску p_k .

Внаслідок значної неоднорідності покладів родовищ України з облаштованою системою ППТ або існуючим природнім водонапірним режимом витіснювальна вода швидко проривається у видобувні свердловини, обходячи

зони з меншою проникністю (так звані цілики нерухомої залишкової нафти). Отже, відсутність фільтрації в окремих пропластках та утворення омитих зон під час витіснення нафти водою призводить до зменшення нафтовилучення із пластів і збільшення кількості обводнених свердловин. Так за даними ПАТ "Укрнафта" [116] 34,3% від загального обсягу запасів відносяться до високообводнених, 42,16% складають малопроникні колектори.

Один із факторів, яким зумовлено неповне витіснення нафти водою – наявність капілярних сил.

Капілярний тиск викликаний капілярними силами визначають за наступною формулою [117]:

$$P_{\text{кап}} = \frac{2\sigma_{\text{н-в}} \cos\theta}{r}, \quad (2.23)$$

де σ – поверхневий натяг на межі поділу нафта-вода; θ – кут змочування поверхні пор водою; r – радіус порового каналу.

За реально існуючих швидкостей витіснення під дією гідродинамічного перепаду тиску нафта з випередженням витісняється з великих порових каналів, а під дією капілярних сил вона з дрібних пор витісняється водою в уже обводнені великі пори, де утворюються окремі краплини нафти у воді (рисунок 2.25).

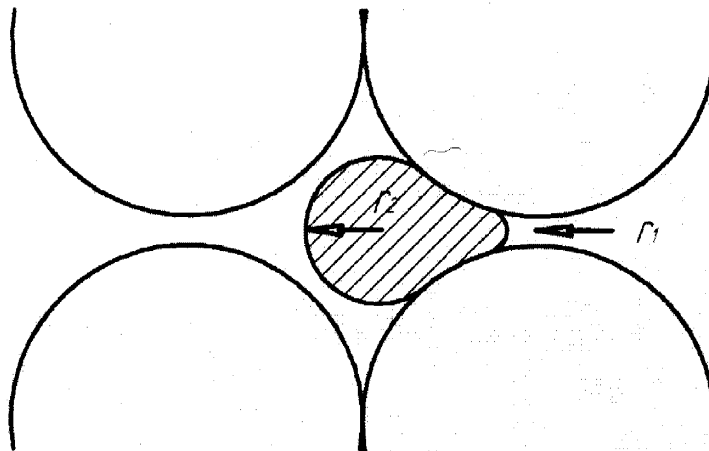


Рисунок 2.25 – Схема витіснення водою краплини нафти з малої пори у велику обводнену

Для витіснення краплини нафти з порового каналу змінного перерізу необхідно подолати різницю капілярних тисків, яку можна знайти за формулою:

$$\Delta p_{\text{кан}} = 2\sigma_{\text{н-в}} \cos \theta \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right), \quad (2.24)$$

де r_1, r_2 – відповідно менший та більший радіуси порового каналу.

Внаслідок проходження пружних хвиль із середнім значенням інтенсивності I_c в пластових умовах спостерігаються зони стиску та розрідження, змінний тиск який виникає при цьому оцінюється за відомою формулою [45]:

$$P_a = \sqrt{2\rho c I_c}, \quad (2.25)$$

де P_a – амплітуда змінного тиску; I_c – середня інтенсивність пружних коливань; c – швидкість розповсюдження поздовжньої пружної хвилі; ρ – середня густина насиченої гірської породи.

Для створення коливань меніску викликаного капілярними силами на межі фаз нафта-вода потрібно, щоб справджувалась нерівність $\Delta P_{\text{кан}} \leq P_a$.

Для спрощення обрахунків приймаємо, що $\theta \rightarrow 0^\circ$ та знаючи з [45, 107], що амплітуда змінного тиску з урахуванням циліндричного розходження хвилі виражається формулою:

$$P_a = \frac{A_0}{\sqrt{x}} e^{-\alpha x} \rho c \omega, \quad (2.26)$$

де P_a – амплітуда змінного тиску; A_0 – початкова амплітуда зміщення; α – коефіцієнт поглинання коливань з віддаллю; x – віддаль від джерела випромінювання; c – швидкість розповсюдження поздовжньої пружної хвилі; ρ – середня густина насиченої гірської породи, ω – кутова частота.

Виведемо зв'язок між мінімальним розміром пор, в яких будуть створені коливання меніску та віддаллю розповсюдження циліндричної пружної хвилі:

$$r \geq \frac{2\sigma_{\text{н-в}} \cdot \sqrt{x}}{A_0 e^{-\alpha x} \rho c \omega}. \quad (2.27)$$

Вказаний ефект динамічної зміни кривизни меніску за допомогою пружних коливань широко застосовується спеціалістами фірми Epson [118]. Технологія

носить назву Active Meniscus Control (Активне Керування Меніском). Вона полягає у використанні п'єзокерамічного ефекту. При подачі імпульсу струму п'єзоелемент зменшується, тим самим створюючи зону розрідження всередині камери (фаза втягування меніска), далі відбувається розширення п'єзоелемента, створюючи зону підвищеного тиску в камері (фаза виштовхування меніска).

Для прикладу, наведемо на рисунку 2.26 як буде динамічно змінюватись радіус кривизни меніска на межі поділу масло-вода під дією пружних коливань. На рисунку 2.27 зображена залежність радіусу пор, в яких може бути змінений капілярний тиск, від інтенсивності пружних коливань для породи з середньою густиною 2600 кг/м^3 , середньою швидкістю розповсюдження пружної хвилі 4000 м/с , трьох значень міжфазного натягу на межі нафта-вода при мінералізаціях 0 г/кг ($\sigma_0 = 13 \text{ мН/м}$), 100 г/кг ($\sigma_{100} = 19 \text{ мН/м}$), 200 г/кг ($\sigma_{200} = 22 \text{ мН/м}$).

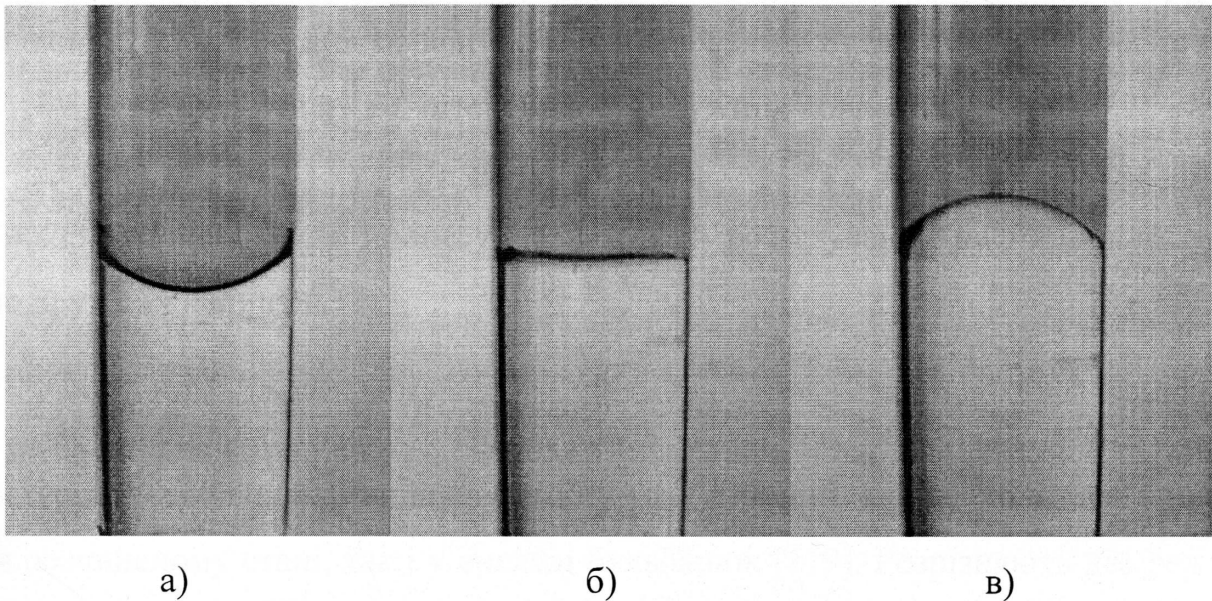


Рисунок 2.26 – Періодична зміна меніска на межі фаз масло-вода під дією пружних коливань частотою $0,5 \text{ Гц}$: а) в стані спокою б) положення меніска, при

$$P_a = \Delta P_{\text{кап}} \text{ в) положення меніска при } P_a = 2 \cdot \Delta P_{\text{кап}}$$

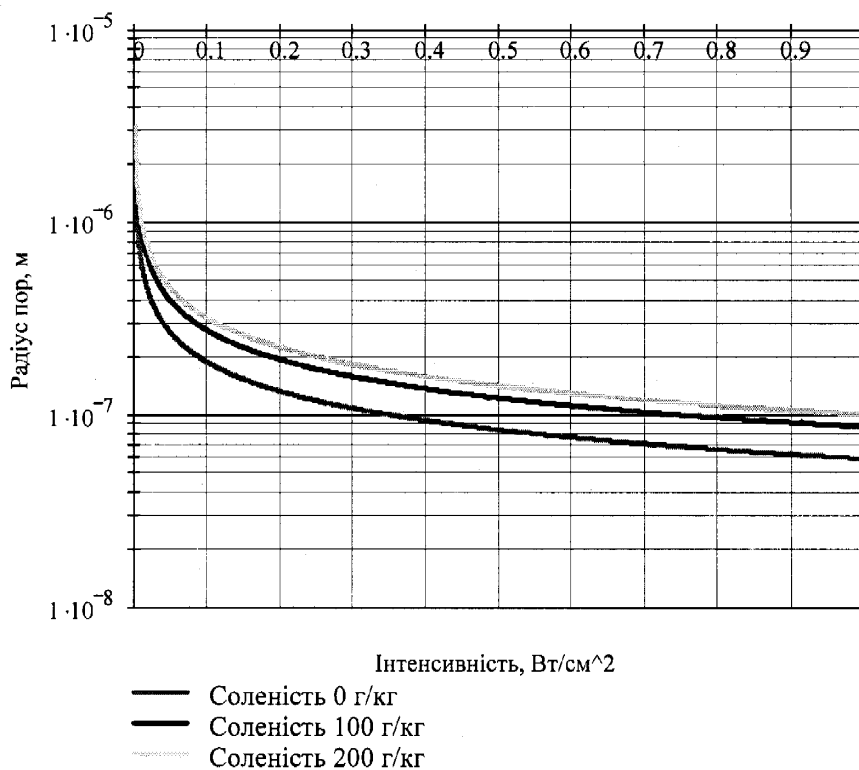


Рисунок 2.27 – Залежність радіусу пор, в яких може бути змінений капілярний тиск, від інтенсивності пружних коливань

2.3.2 Дослідження процесу додаткового розгазування нафти в пласті під дією пружних коливань

Під впливом акустичних коливань ультразвукового діапазону частот спостерігається явище зменшення вмісту газу в рідині, яка знаходиться в ньому, як в розчиненому стані, так і у вигляді бульбашок [119]. Розрізняють два режими ультразвукової дегазації: доквітаційний та при наявності квітації.

Степановою та Ніколаєвським [120] показано, що при значеннях газового фактору вище 30 м³/м³ навіть короточасний вплив пружними коливаннями на нафтовий пласт може викликати в ньому процес часткового розгазування нафти. В роботі [121] Ніколаєвський досліджував вплив ультразвукового випромінювання на витіснення нафти водою. Дослідження проводились при кімнатній температурі на горизонтально розміщеній моделі пласта, яка була заповнена піском. Всередині моделі був змонтований ультразвуковий випромінювач та приймач коливань, частоту коливань автори не наводять, тому

припускаємо, що $f=16-20$ кГц. Амплітуда коливань становила 60 кПа. В якості моделі нафти використовували трансформаторне масло, яке було насичене пропан-бутановою фракцією. Поровий об'єм пласта складав 170 см^3 , проникність $0,478 \text{ мкм}^2$. Середній газовий фактор складав $9,6 \text{ см}^3/\text{см}^3$, експериментальний пластовий тиск $1,2-1,25$ МПа. Автор показав, що акустичний вплив на модель пласта збільшує тиск в цій моделі на 20-30%. Підвищення тиску в моделі пласта, було обумовлено частковим розгазуванням газорідної суміші та збільшенням її сумарного об'єму за умови перевищення тиску в системі над тиском насичення. Це веде до витіснення флюїду з моделі пласта не тільки за рахунок заводнення, а й за рахунок енергії виділеного газу, який при виділенні з нафти концентрується у вигляді облямівки мікробульбашок (піни) на межі між нафтою та водою.

Розглянемо випадок коли поклад розробляється на гравітаційному режимі. При хвильовому впливі на нафтогазонасичені породи спостерігається чергування фаз підвищення та пониження тиску відносно встановленого значення тиску в пласті. З урахуванням відомих лабораторних та промислових випробувань [121,122], можна стверджувати, що ініціюючими факторами в механізмі хвильового впливу є додаткове вивільнення з нафти газової фази в момент пониження тиску з одночасними її ізобаричним розширенням та просуванням під впливом постійно діючого градієнту гідродинамічних тисків в напрямку видобувних свердловин по принципу пластового ліфтування. Відомо, що процеси розчинення і виділення газу не є тотожні [123]. Так як тиск розчинення відчутно вищий тиску розгазування, тому відбувається послідоюча затримка зворотного розчинення виділеної газової фази за рахунок явища гістерезису [124].

Оцінімо амплітуду зміни тиску в фазах підвищення і пониження тиску внаслідок хвильового впливу інтенсивністю $1 \text{ Вт}/\text{см}^2$. Як уже відомо з розділу 2 амплітуда змінного тиску циліндричної хвилі з врахуванням поглинання виражається формулою:

$$P_a = \frac{A_0}{\sqrt{x}} e^{-\alpha x} 2\pi f \rho c, \quad (2.28)$$

де P_a – амплітуда змінного тиску; A_0 – початкова амплітуда зміщення; α – коефіцієнт поглинання коливань з віддаллю; x – віддаль від джерела випромінювання; c – швидкість розповсюдження поздовжньої пружної хвилі; ρ – середня густина насиченої гірської породи, f – частота.

Знаючи формулу визначення інтенсивності коливань $I = c \cdot \rho \cdot \omega^2 \cdot A^2 / 2$, знайдемо значення амплітуди коливань частинок породи з виразу:

$$A = \sqrt{\frac{I}{2 \cdot \pi^2 \cdot f^2 \cdot \rho \cdot c}} \quad (2.29)$$

Графіки залежностей амплітуди змінного тиску від віддалі для частот 50, 300, 1000, 20000 Гц в породі середньою густиною 2600 кг/м^3 та середньою швидкістю розповсюдження пружної хвилі 4000 м/с зображені на рисунку 2.28.

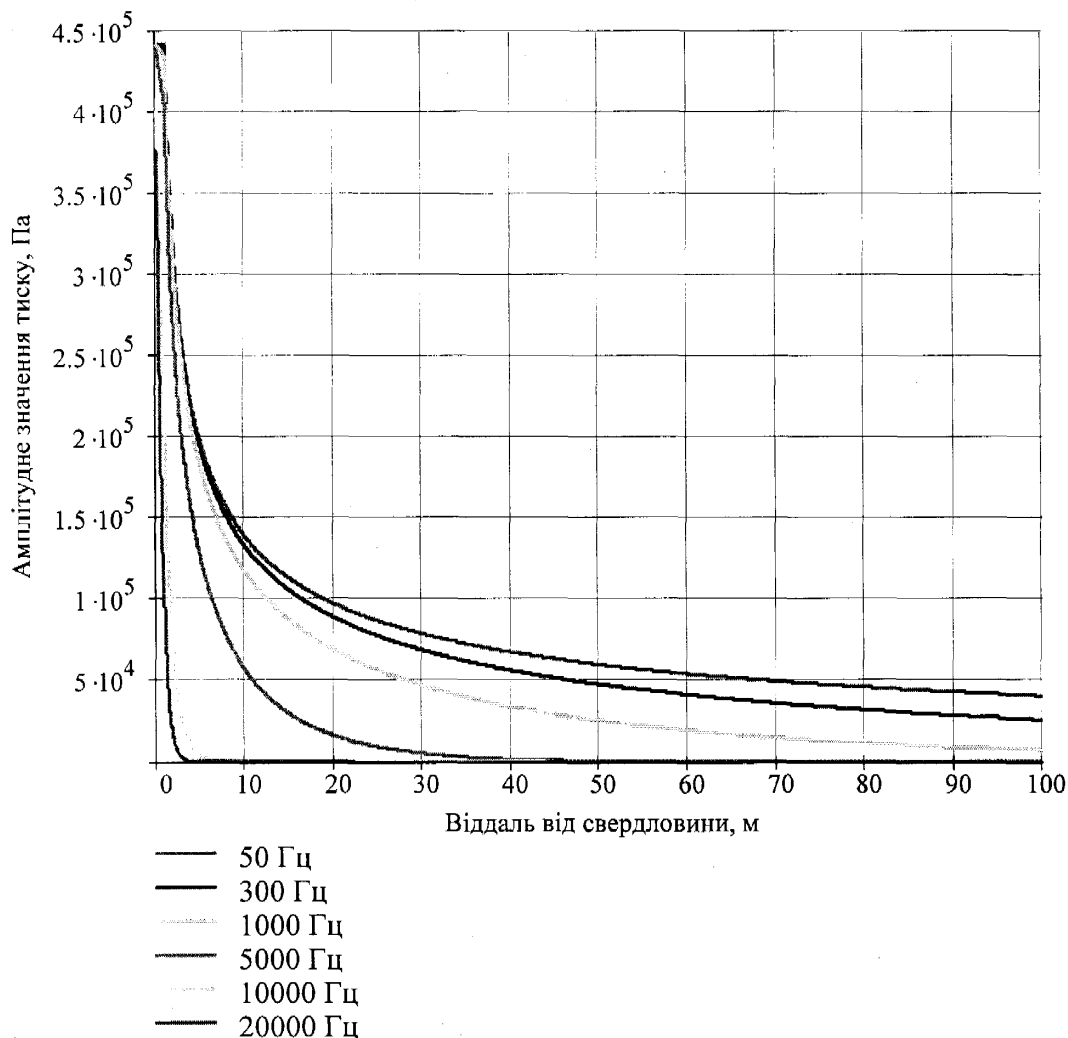


Рисунок 2.28 – Залежність амплітуди змінного тиску початковою інтенсивністю 1 Вт/см^2 від віддалі для частот 50, 300, 1000, 5000, 10000, 20000 Гц

Зіставимо отримані значення зміни тиску внаслідок хвильового впливу початковою інтенсивністю 1 Вт/см^2 та частотою 50 Гц із існуючим розподілом тиску знайденим за формулою (2.30) у гіпотетичному пласті з пластовим тиском $P_{nl}=20 \text{ МПа}$, тиском на вибої $P_g=8 \text{ МПа}$, відстанню до контуру живлення $R_k=100 \text{ м}$, радіусом свердловини $r_c=0,1 \text{ м}$ (рисунок 2.29).

$$P(r) = P_{nl} - \frac{P_{nl} - P_g}{\ln\left(\frac{R_k}{r_c}\right)} \cdot \ln\left(\frac{R_k}{r}\right). \quad (2.30)$$

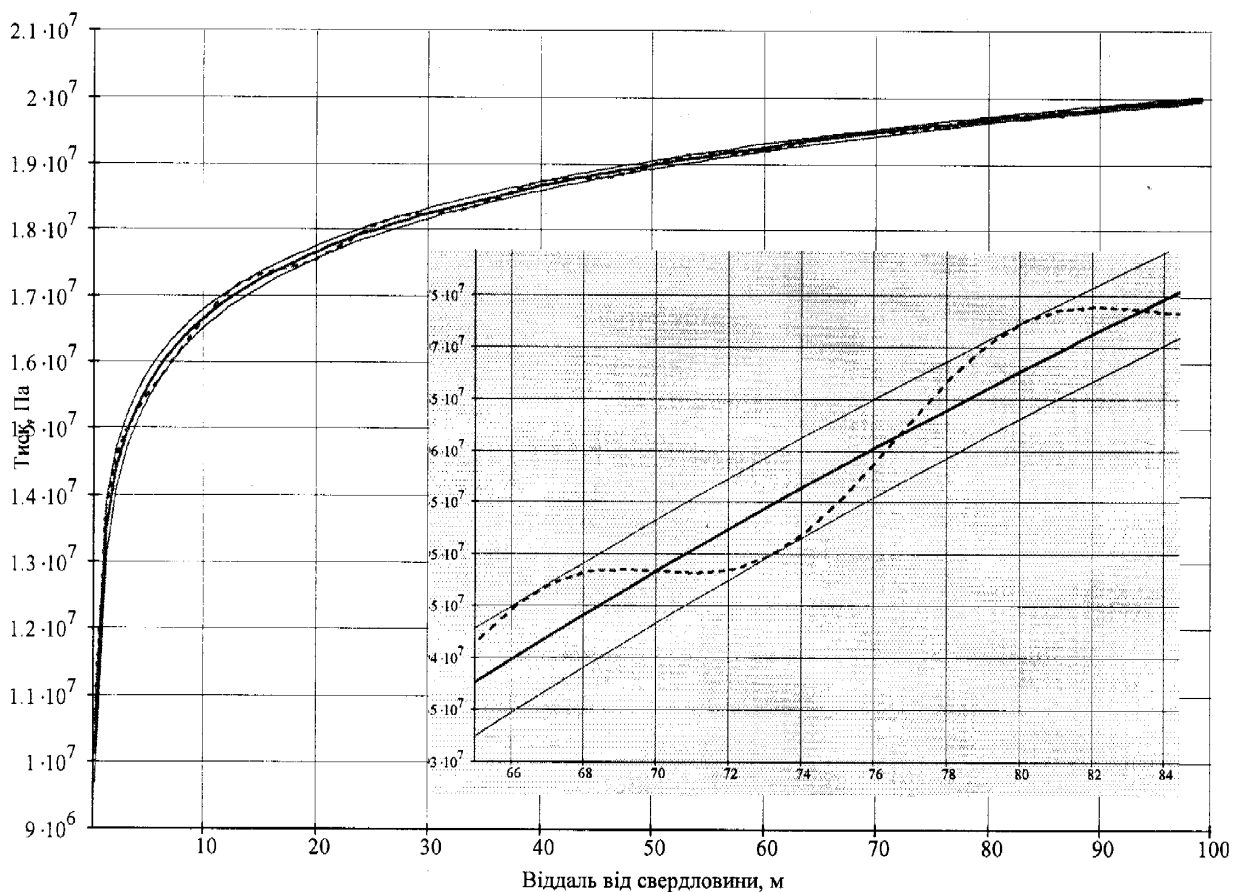


Рисунок 2.29 – Суміщений розподіл тиску в пласті і динамічної зміни тиску внаслідок хвильового впливу

Використання даного ефекту доцільно при розробці нафтового родовища на завершальній стадії за умови повного виділення газу при даному тиску. Як видно з рисунків 2.28 і 2.29 даний ефект найкраще використовувати за допомогою низьких частот, для уникнення прориву газу до видобувних свердловин внаслідок

укрупнення мікробульбашок. Таким чином енергія додатково виділеного газу буде допоміжною рушійною силою для покращення фільтрації [125].

Для підтвердження реалізації описаного ефекту при використанні низького діапазону частот проведено експериментальні дослідження по дії пружних коливань на процеси розгазування нафти в насипній моделі пласта, які наведені в розділі 3.

2.3.3 Вивчення явища руйнування колоїдно-дисперсних систем в ПЗП під впливом пружних коливань

Найбільше використовують пружні коливання в нафтогазовидобувній промисловості при потребі очистити ПЗП від продуктів кольтатації. Тут проявляється третій ефект, який полягає у виникненні високих градієнтів тиску в привибійній зоні пласта внаслідок хвильового впливу на пласт на високих частотах.

Практично всі нафти родовищ України мають високомолекулярні вуглеводні. В присвердловинній зоні пласта за рахунок зниження тиску і температури виникає кристалізація парафінів і випадання солей, що приводить до утворення колоїдно-дисперсних систем. Це в свою чергу спричиняє збільшення в'язкості системи аж до проявлення неньютонівських властивостей з виникненням граничної напруги зсуву, що суттєво знижує швидкість фільтрації і продуктивність свердловини. Дисперсні частинки створюють додаткові втрати тиску при робочих депресіях і за рахунок Ван-дер-Вальсових сил відбувається їх зчеплення, що обумовлює перекриття порових каналів і появу такого явища як бриджинг (рисунк 2.30) [126,127]. Вплив пружними коливаннями на такі системи дозволяє зруйнувати їх структуру або значно знизити їх міцність [128,129].

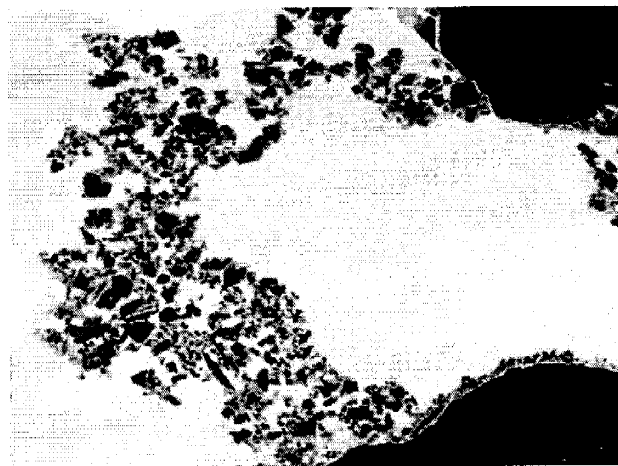


Рисунок 2.30 – Явище перекриття порових каналів (бриджинг)

Проведемо оцінку градієнту тиску, який виникає в ПЗП при хвильовому впливі із використанням відомої формули (2.31):

$$\text{grad}P_k = \frac{4P}{\lambda}, \quad (2.31)$$

де P – амплітуда змінного звукового тиску; $\text{grad}P_k$ – градієнт тиску, який створюється внаслідок проходження пружних коливань; λ – довжина пружної хвилі.

Враховуючи, що при обробці ПЗП гідроімпульсним методом переважна частота випромінювачів складає 10-30 кГц, $\text{grad}P_k$ змінюється в межах від 0,1 до 0,01 МПа/м.

Відновлення продуктивності або приймальності свердловини досягається за рахунок руйнування і вилучення з пласта органічних і неорганічних структур, які кольматують привибійну зону пласта в процесі буріння, видобутку або нагнітання, що в свою чергу призводить до утворення скін-шару [130,131]. Забруднення ПЗП виникає головним чином в результаті відкладення частинок, розмір яких менше ефективних розмірів порових каналів. Стійкість органічних КДС пов'язана з низьким міжфазним натягом поверхні частинка-вуглеводнева рідина та різницею в їх густинах.

Для руйнування такої структури потрібно змусити неньютонівську рідину рухатись крізь пористе середовище, внаслідок чого відбудеться руйнування

просторової сітки КДС. Необхідний для початку руху неньютонівської рідини через пористе середовище граничний градієнт тиску можна оцінити за допомогою нерівності [132,133]:

$$\text{grad}P_{\text{кдс}} > \frac{\tau_0}{\sqrt{k_{\text{пр}}}}, \quad (2.32)$$

де τ_0 – гранична напруга зсуву, яка відповідає мінімальному перепаду тиску, що викликає руйнування просторової сітки КДС; $k_{\text{пр}}$ – коефіцієнт проникності пласта.

Для прикладу, для Таймурзинського родовища при в'язкості нафти 16 мПа·с, граничний градієнт тиску структурованих КДС рівний 0,095 МПа/м [134].

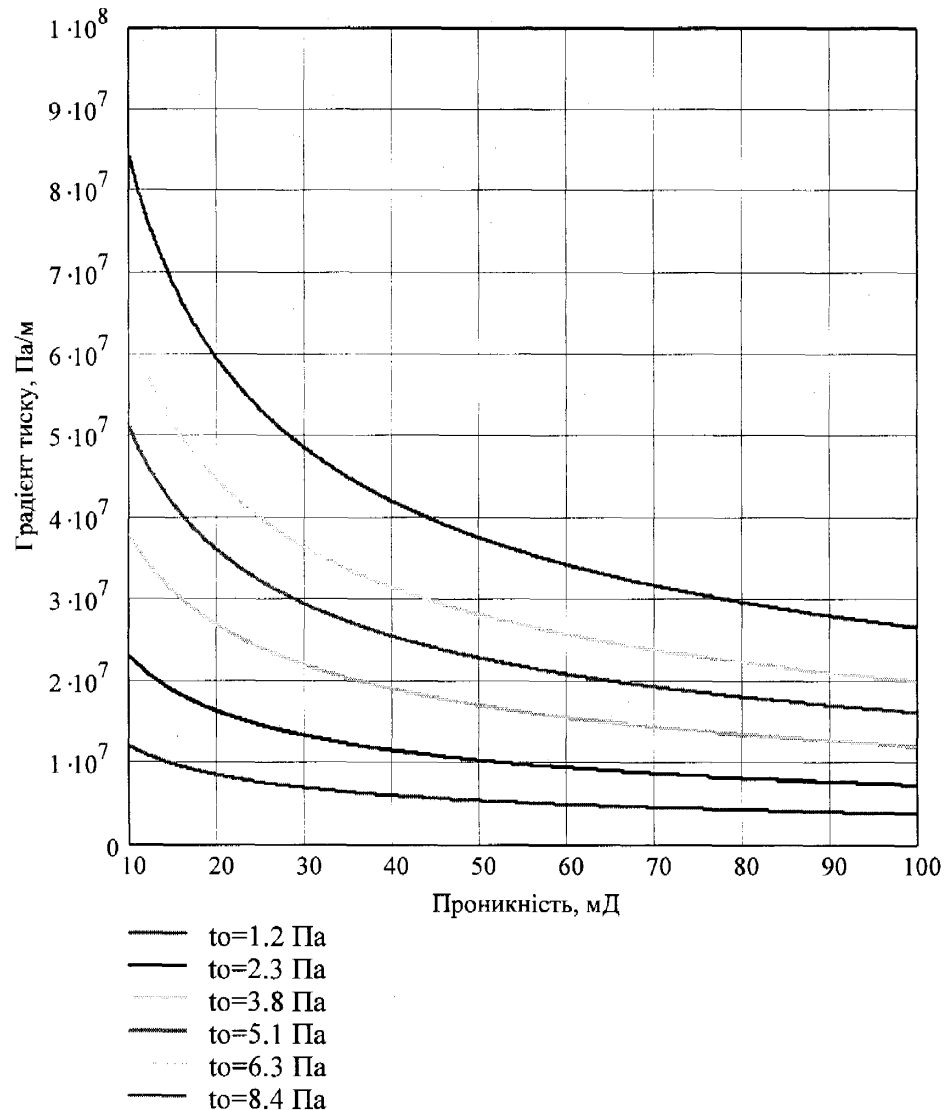


Рисунок 2.31 – Залежність граничного градієнту тиску від проникності пласта для ряду структурованих КДС з різними τ_0

Порівняємо отримані результати з реальними градієнтами гідродинамічних тисків $gradP_z$, які виникають в ПЗП за формулою з [117, 132]:

$$gradP_z = \frac{P_{nl} - P_g}{\ln\left(\frac{R_k}{r_c}\right)} \cdot \frac{1}{r}, \quad (2.33)$$

де P_{nl} – пластовий тиск, приймаємо 20 МПа; P_g – вибійний тиск, приймаємо 8 МПа; R_k – відстань до точки пласта з тиском рівним пластовому, приймаємо 1000 м; r_c – радіус свердловини, приймаємо 0,1 м.

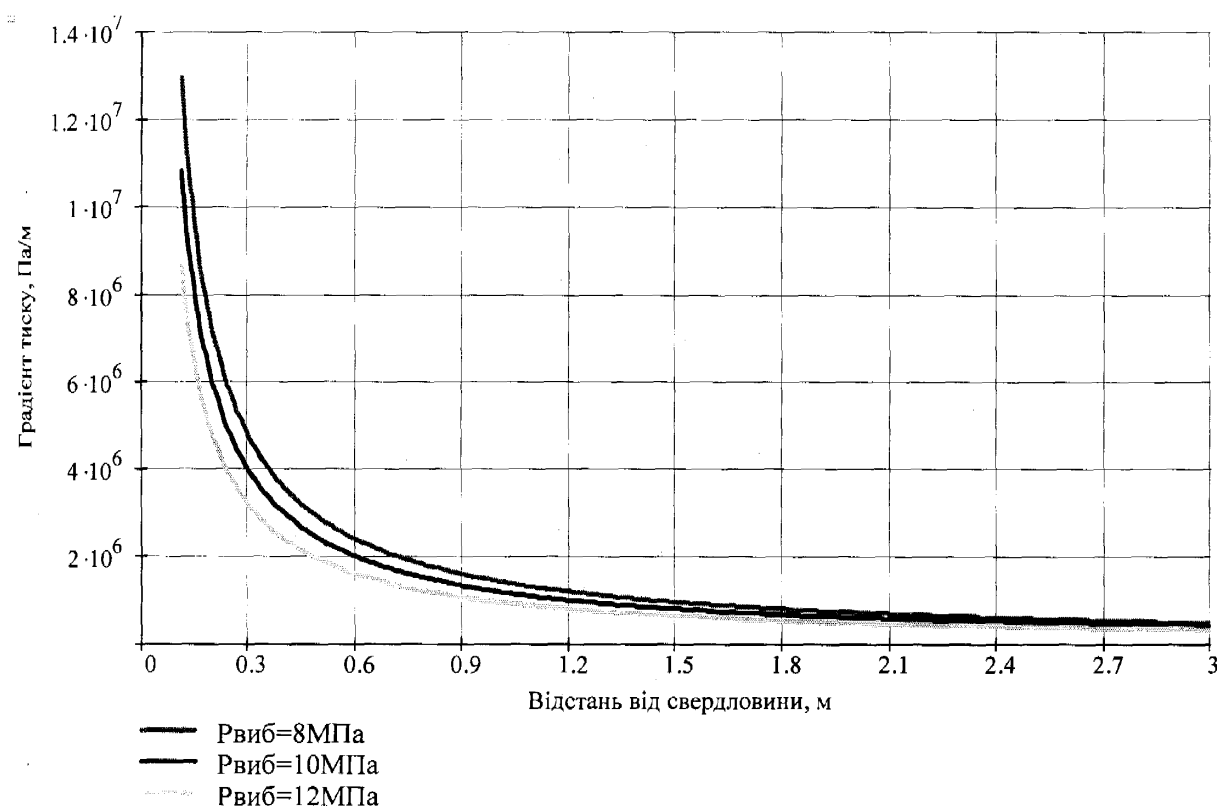


Рисунок 2.32 – Градієнт гідродинамічних тисків на ділянці 0,1-3 м для трьох значень вибійного тиску та пластового тиску 20 МПа

Як бачимо з рисунків 2.31 і 2.32 існуючі градієнти гідродинамічних тисків $gradP_z$ здатні подолати граничну напругу зсуву структурованих КДС тільки для нафти з $\tau_0 = 1.2$ Па при проникності більше 30 мД. В іншому випадку виникає потреба в додатковому градієнті тиску, який можна отримати внаслідок

хвильового впливу на пласт. У такому разі, щоб подолати граничну напругу зсуву потрібно, щоб виконувалась умова: $gradP_z + gradP_k > gradP_{кдс}$. Або

$$\frac{P_{nl} - P_g}{\ln\left(\frac{R_k}{r_c}\right)} \cdot \frac{1}{r} + \frac{4P}{\lambda} > \frac{\tau_0}{\sqrt{k_{np}}}. \quad (2.34)$$

Значення градієнтів тиску внаслідок хвильового впливу $gradP_k$ та сумарні градієнти $gradP_z + gradP_k$ для різних частот інтенсивністю 1 Вт/см^2 зображені на рисунках 2.33 і 2.34.

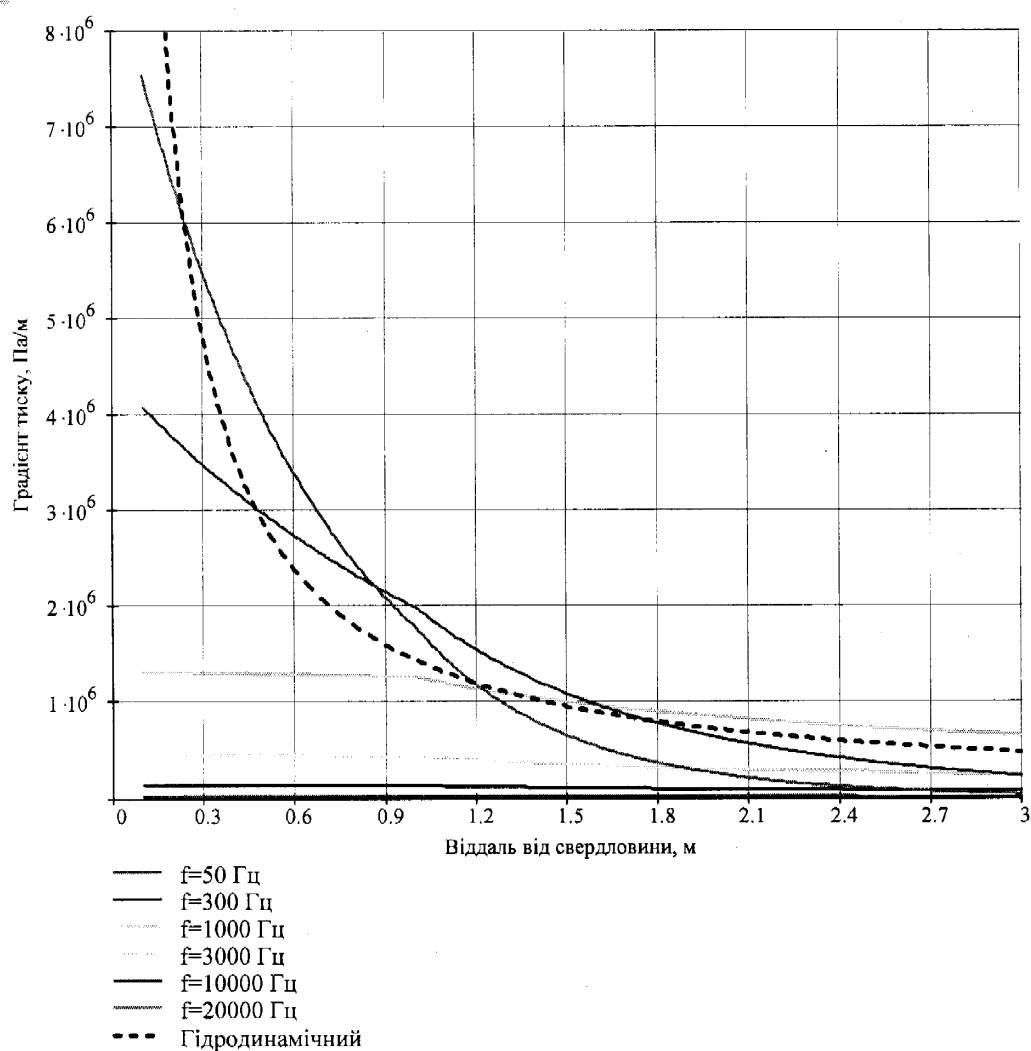


Рисунок 2.33 – Градієнти тиску внаслідок хвильового впливу $gradP_k$ для частот 50, 300, 1000, 3000, 10000, 20000 Гц інтенсивністю 1 Вт/см^2 та градієнт гідродинамічних тисків ($P_g = 8 \text{ МПа}$; $P_{nl} = 20 \text{ МПа}$) на відстані до 3 м

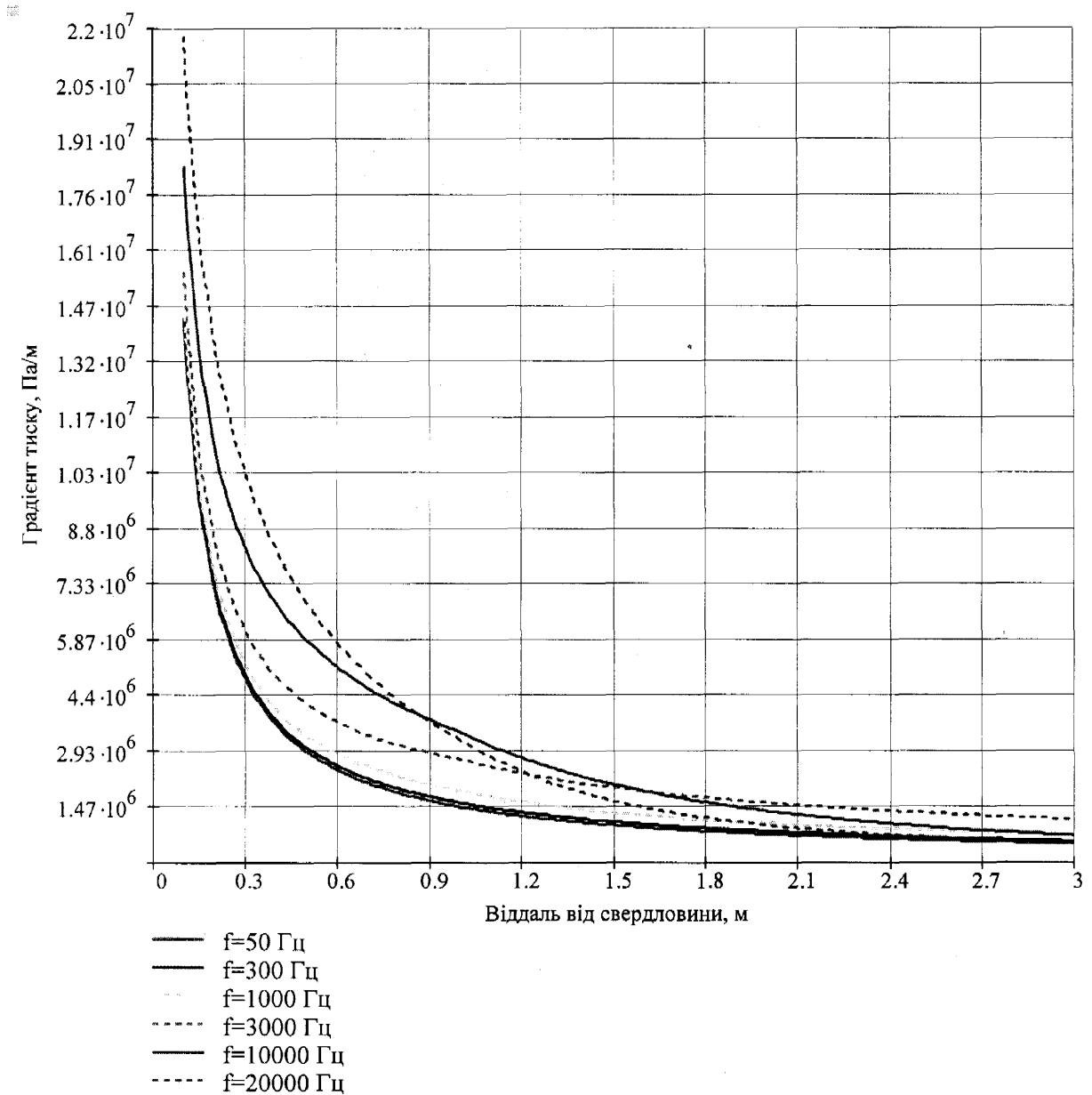


Рисунок 2.34 – Сумарні градієнти тисків $gradP_z + gradP_k$ для частот 50, 300, 1000, 3000, 10000, 20000 Гц початковою інтенсивністю 1 Вт/см^2

Як бачимо з рисунків 2.33 і 2.34, найбільш доцільним для впливу на ПЗП буде використання коливань височастотного діапазону. Результатом сумісної роботи двох градієнтів буде подолання граничної напруги зсуву КДС з невеликими значеннями τ_0 , причому, як зазначається в роботах [128,129,133], при довготривалому впливі акустичними хвилями на пласт відбувається послаблення структурної сітки КДС із значно вищими значеннями τ_0 і подальше зниження

граничної напруги зсуву, як наслідок збільшення рухливості і зменшення стійкості системи.

Після оброблення ПЗП пружними коливаннями необхідно створити оптимальну для конкретних геолого-технічних умов депресію на пласт з допомогою стандартних технологій та обладнання з метою видалення мікродисперсних частинок із пласта.

2.3.4 Доповнення рівняння фільтрації неньютонівської нафти з врахуванням хвильової дії на пласт

Четвертим технологічним ефектом хвильового впливу на пласт є виникнення додаткового градієнту тиску. Цей ефект ми частково розглянули у випадку впливу на ПЗП для руйнування структурованих КДС. Для його опису розглянемо модель нафтонасиченого пласта, в якому відбувається постійне зниження пластового тиску і відповідно $grad P_z$. Розглянемо продуктивний пласт низької проникності до 30 мД.

Для проведення теоретичних досліджень із впливу пружних коливань на модель пласта приймалися додаткові припущення:

- поклад є літологічно обмежений (замкнуто-пружний режим), в якому, на контурі обмеження пласта, що збігається з контуром нафтоносності, тиск зменшується з часом, а також зменшується тиск у покладі [117];

- низькопроникна зона пласта складає 100% від загальної площі покладу.

У випадку, якщо закон Дарсі не порушується – математична модель фільтрації в такому низькопроникному пласті описується відомою формулою [117,135]:

$$Q = \frac{2\pi kh(P_{nl} - P_c)}{\mu \ln\left(\frac{R_k}{r_c}\right)}, \quad (2.35)$$

де Q – дебіт свердловини в низькопроникному пласті; h – товщина пласта; P_{nl} – тиск на відстані R_k від свердловини; P_c – тиск на вибої свердловини; μ –

динамічний коефіцієнт в'язкості рідини; k – коефіцієнт проникності пласта; r_c – радіус свердловини; R_k – радіус контуру живлення.

Зміну розподілу тисків в низькопроникному пласті, зображену на рисунку 2.35, знайдемо за формулою (2.30) з аналогічними параметрами пласта.

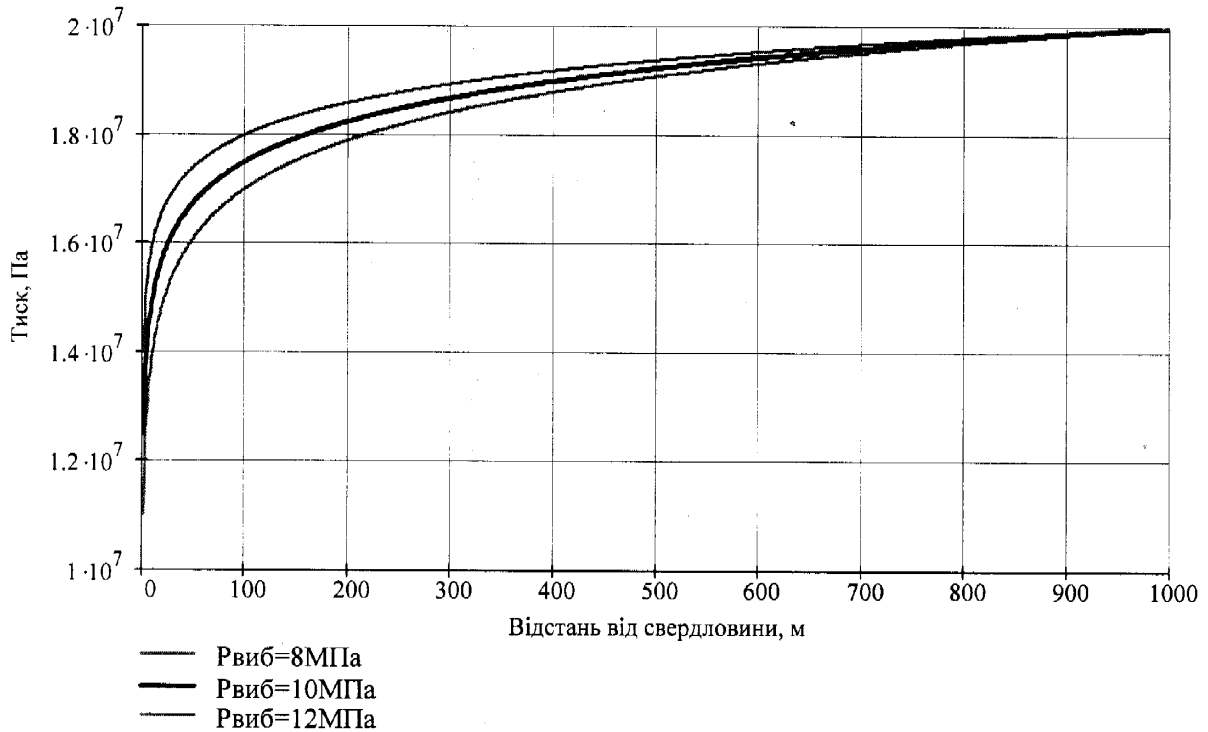


Рисунок 2.35 –Зміна розподілу тиску в пласті з пластовим тиском 20 МПа

Як встановлено в [117,132,136] закон Дарсі може порушуватись у нижній межі за малих градієнтів тиску. В такому випадку рідина себе починає вести як неньютонівська. Неньютонівські властивості пластових систем проявляються за малих швидкостей фільтрації і в середовищах з малою проникністю. Згідно з [136] нелінійні рідини можна розділити на три групи:

- стаціонарно реологічні;
- нестаціонарно реологічні;
- в'язкопружні.

Найбільш вивчені нафти з в'язкопластичними властивостями, для яких справедливе рівняння:

$$\tau = \tau_0 + \mu' \frac{du}{dy}, \quad (2.36)$$

де τ – дотична напруга зсуву; τ_0 – динамічна напруга зсуву; μ' – динамічний коефіцієнт пластичної в'язкості; du/dy – градієнт швидкості зсуву.

З сказаного вище можемо зробити висновок, що в досліджуваній моделі пласта, під час падіння пластового тиску внаслідок роботи покладу настає момент часу, коли в низькопроникному пласті встановлюється такий критичний градієнт гідродинамічних тисків $grad P_{кр}$, при якому порушується закон Дарсі в нижній межі. В такому випадку в пласті маємо фільтрацію неньютонівської рідини з в'язкопластичними властивостями.

А.Х. Мірзаджанзаде [137], запропонував записати узагальнений закон Дарсі для фільтрації в'язкопластичної рідини так:

$$\bar{v} = -\frac{k}{\mu} \left(1 - \frac{|\gamma|}{|grad P|} \right) grad P \text{ для } |grad P| > |\gamma|; \quad (2.37)$$

$$\bar{v} = 0 \text{ для } |grad P| \leq |\gamma|, \quad (2.38)$$

де v – швидкість фільтрації; k – коефіцієнт проникності; μ – динамічний коефіцієнт в'язкості рідини; $grad P$ – градієнт тиску; γ – початковий градієнт тиску.

Зв'язок початкового градієнту тиску з динамічною напругою зсуву пов'язаний співвідношенням:

$$\gamma = \frac{\tau_0}{\sqrt{k}}. \quad (2.39)$$

Початковий градієнт тиску для ряду нафтових родовищ знаходиться в межах від 0,3 до 100 кПа/м і його залежність від проникності для ряду нафт зображена на рисунку 2.35 [134].

Запишемо узагальнений закон Дарсі у випадку фільтрації до свердловини в'язкопластичної нафти [117]:

$$v = \frac{k}{\mu} \left(\frac{dp}{dr} - \gamma \right) = \frac{Q}{2\pi rh}, \quad (2.40)$$

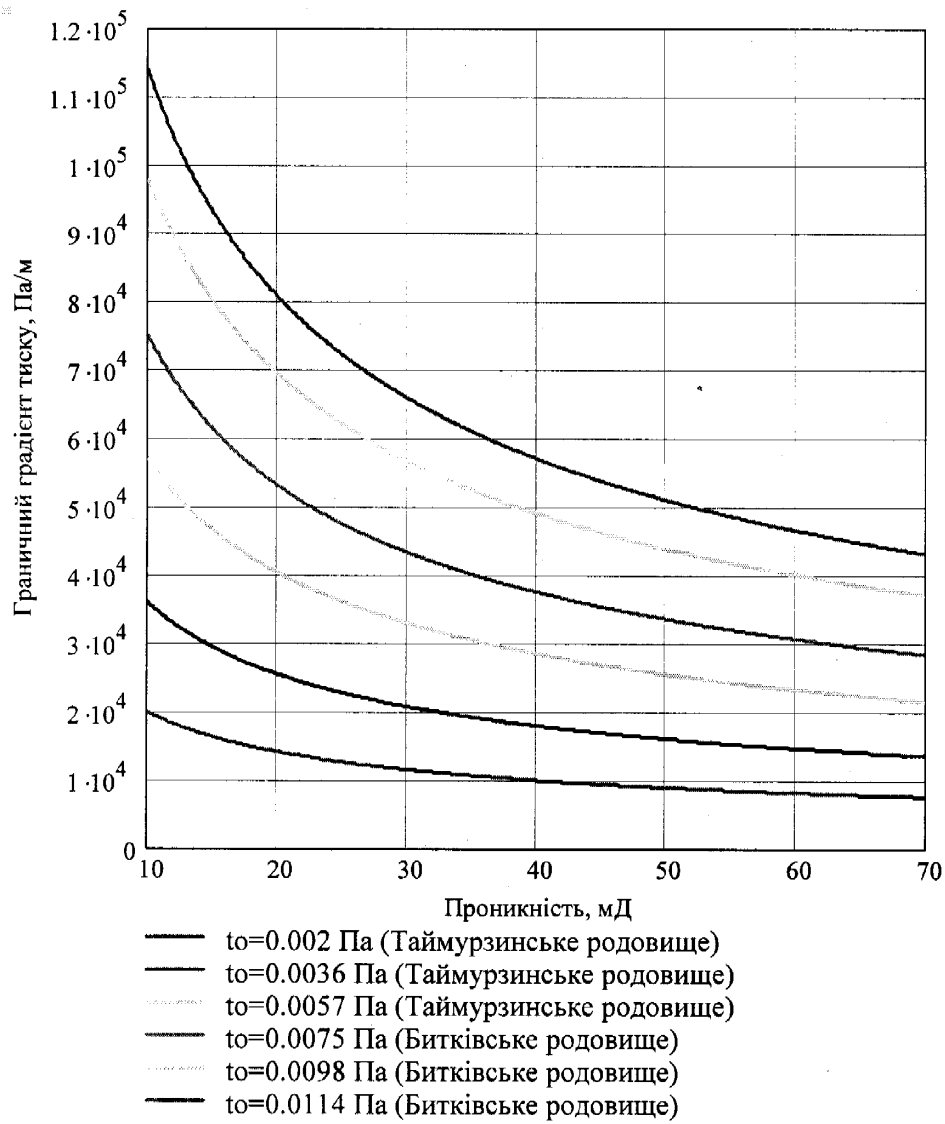


Рисунок 2.35 – Залежність граничного градієнту тиску від проникності пласта для ряду нафт Таймурзинського та Битківського родовищ

звідки

$$\frac{dp}{dr} - \gamma = \frac{Q\mu}{2\pi kh} \frac{1}{r}; \quad (2.41)$$

$$\int_{p_c}^p dp - \gamma \int_{r_c}^r dr = \frac{Q\mu}{2\pi kh} \int_{r_c}^r \frac{dr}{r}; \quad (2.42)$$

$$(p - p_c) - \gamma(r - r_c) = \frac{Q\mu}{2\pi kh} \ln \frac{r}{r_c}. \quad (2.43)$$

Оскільки тиск $p = p_k$ для радіуса $r = R_k$, тоді відоме рівняння фільтрації в'язкопластичної нафти в пласті матиме вигляд:

$$Q = \frac{2\pi kh[(p_k - p_c) - \gamma(R_k - r_c)]}{\mu \ln \frac{R_k}{r_c}}. \quad (2.44)$$

Отже, для усталеної фільтрації в'язкопластичної нафти в пласті, депресія тиску $\Delta p = (p_k - p_c)$ має подолати початковий перепад тиску $\Delta p_0 = \gamma(R_k - r_c)$, якщо ж $\Delta p \leq \Delta p_0$, тоді $\vec{v} = 0$. Введемо у відоме рівняння (2.44) додатковий параметр – градієнту тиску, який виникає внаслідок проходження пружних коливань. В цьому випадку ефект додаткового градієнта тиску частково дозволить компенсувати нестачу енергії пласта необхідну для початку руху неньютонівської рідини з в'язкопластичними властивостями.

Визначимо градієнт тиску, який створюється внаслідок проходження пружних коливань із середнім значенням інтенсивності $I = 1 \text{ Вт/см}^2$, аналогічно як у формулі (2.34). Відомо, що зв'язок інтенсивності і амплітуди змінного тиску визначається за формулою [45]:

$$I = P^2 / 2\rho c, \quad (2.45)$$

де I – інтенсивність пружних коливань; c – швидкість розповсюдження поздовжньої пружної хвилі; ρ – середня густина насиченої гірської породи.

Середній градієнт тиску, який утворюється при проходженні пружної хвилі знаходимо з використанням формули (2.31), яку виразимо через інтенсивність циліндричної хвилі з врахуванням поглинання:

$$P = \sqrt{\frac{2\rho c \cdot I \cdot e^{-2\alpha r}}{r}}; \quad \lambda = c/f; \quad (2.46)$$

звідки

$$\text{grad}P_k = \frac{4\sqrt{\frac{2\rho c \cdot I \cdot e^{-2\alpha r}}{r}}}{c/f} = f\sqrt{\frac{32\rho \cdot I \cdot e^{-2\alpha r}}{c \cdot r}}; \quad (2.47)$$

де P – амплітуда змінного звукового тиску; $\text{grad}P_k$ – градієнт тиску, який створюється внаслідок проходження пружних коливань; ρ – середня густина

насиченої гірської породи; c – швидкість розповсюдження поздовжньої пружної хвилі; λ – довжина пружної хвилі; f – частота гармоніки.

Для фільтрації в'язкопластичної нафти в пласті потрібно щоб справджувалась нерівність $\text{grad } P > \gamma$ в рівнянні (2.37).

Розглянемо $\text{grad } P_{\text{сум}}$, як суму градієнта тиску, який встановився в пласті та градієнта тиску, який створюється внаслідок проходження пружних коливань. Отримаємо:

$$\begin{aligned} \text{grad } P_{\text{сум}} &= \text{grad } P_z + \text{grad } P_k, \\ \text{grad } P_z + \text{grad } P_k &> \gamma. \end{aligned}$$

Позначимо $\text{grad } P_k$, як β , а з врахуванням залежності від відстані $\beta(r)$ перенесемо за знак нерівності

$$\text{grad } P_{\text{пл}} > \gamma - \beta(r).$$

Тоді рівняння (2.44) із врахуванням хвильового впливу набуде вигляду:

$$Q = \frac{2\pi kh[(p_k - p_c) - (\gamma - \beta(r))(R_k - r_c)]}{\mu \ln \frac{R_k}{r_c}}. \quad (2.48)$$

Як бачимо з рівняння (2.48) видно, що для фільтрації в'язкопластичної нафти в пласті у випадку дії пружних коливань потрібне менше значення

$$\text{градієнту тиску на величину } \beta(r) = f \sqrt{\frac{32\rho \cdot I \cdot e^{-2\alpha \cdot r}}{c \cdot r}}.$$

Розподіл тиску в гіпотетичному низькопроникному пласті, середньою густиною 2600 кг/м^3 , середньою швидкістю розповсюдження 4000 м/с , враховуючи хвильовий вплив буде описуватись рівнянням виду

$$P(r) = P_{\text{пл}} - \frac{P_{\text{пл}} - P_e}{\ln\left(\frac{R_k}{r_c}\right)} \cdot \ln\left(\frac{R_k}{r}\right) + \sqrt{\frac{2\rho c \cdot I \cdot e^{-2\alpha \cdot r}}{r}} \cdot \cos(\omega t - kr + \phi), \quad (2.49)$$

і набуде вигляду для частоти 300 Гц і початковою інтенсивності 1 Вт/см^2 зображений на рисунку 2.38.

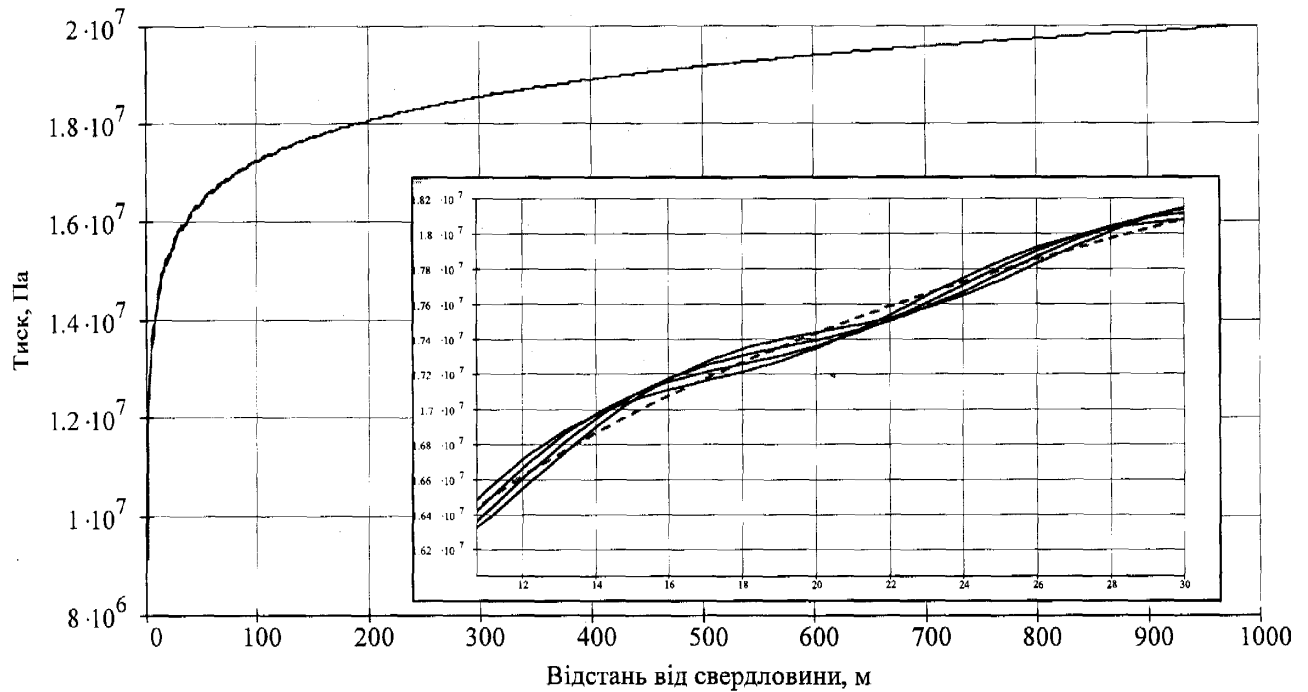


Рисунок 2.38 – Зміна розподілу тиску в низькопроникному пласті з врахуванням дії пружних коливань

Порівняємо значення градієнта гідродинамічних тисків (рисунок 2.39, 2.40) і сумарного градієнта в пласті під дією пружних коливань (рисунок 2.41) із початковим градієнтом тиску для нафти з τ_0 2 мПа при проникності 30 мД.

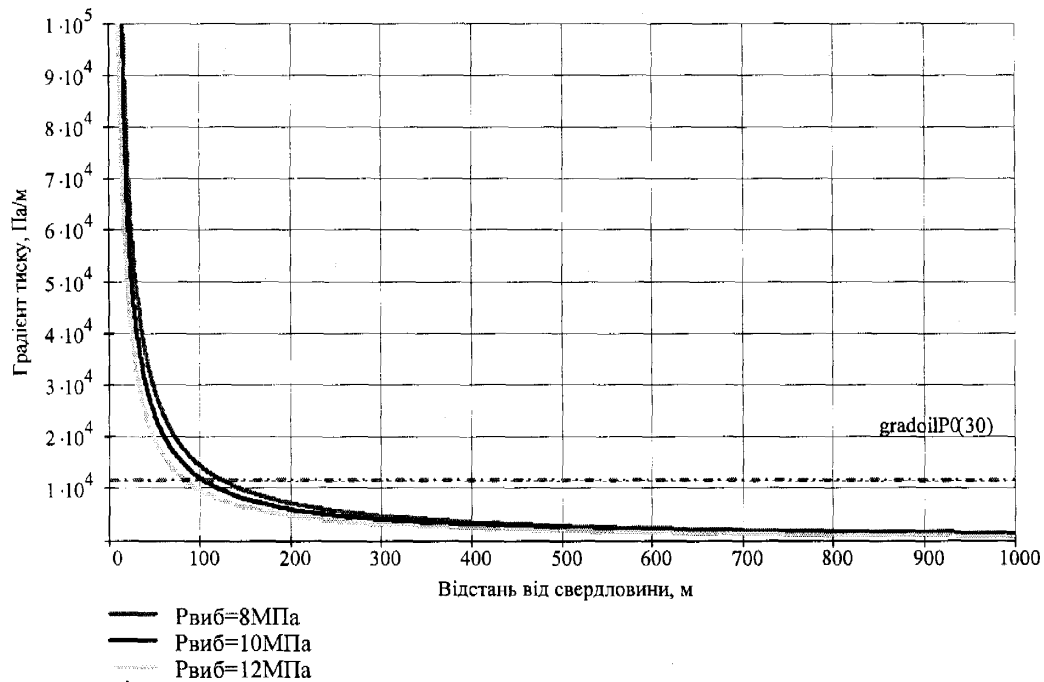


Рисунок 2.39 – Градієнт гідродинамічних тисків на ділянці 0,1-1000 м для трьох значень вибійного тиску і пластовому тиску 20 МПа

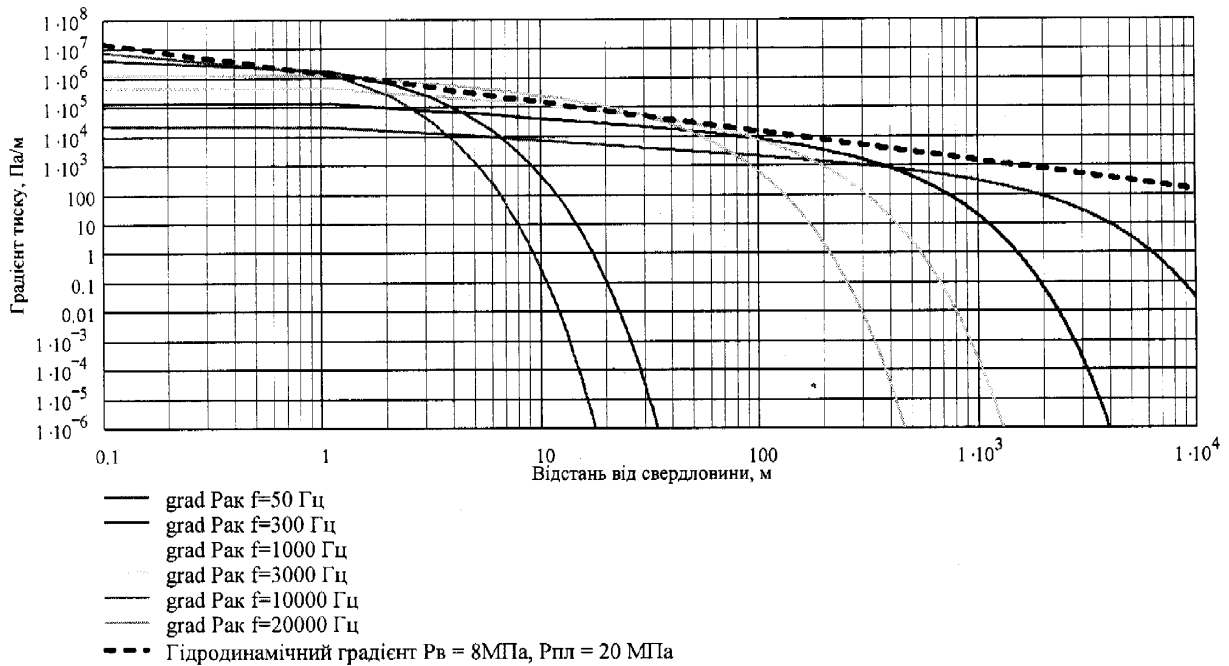


Рисунок 2.40 – Градієнти тиску внаслідок хвильового впливу $gradP_k$ для частот 50, 300, 1000, 3000, 10000, 20000 Гц інтенсивністю 1 Вт/см² та градієнт гідродинамічних тисків ($P_g = 8$ МПа; $P_{пл} = 20$ МПа) на відстані до 1000 м

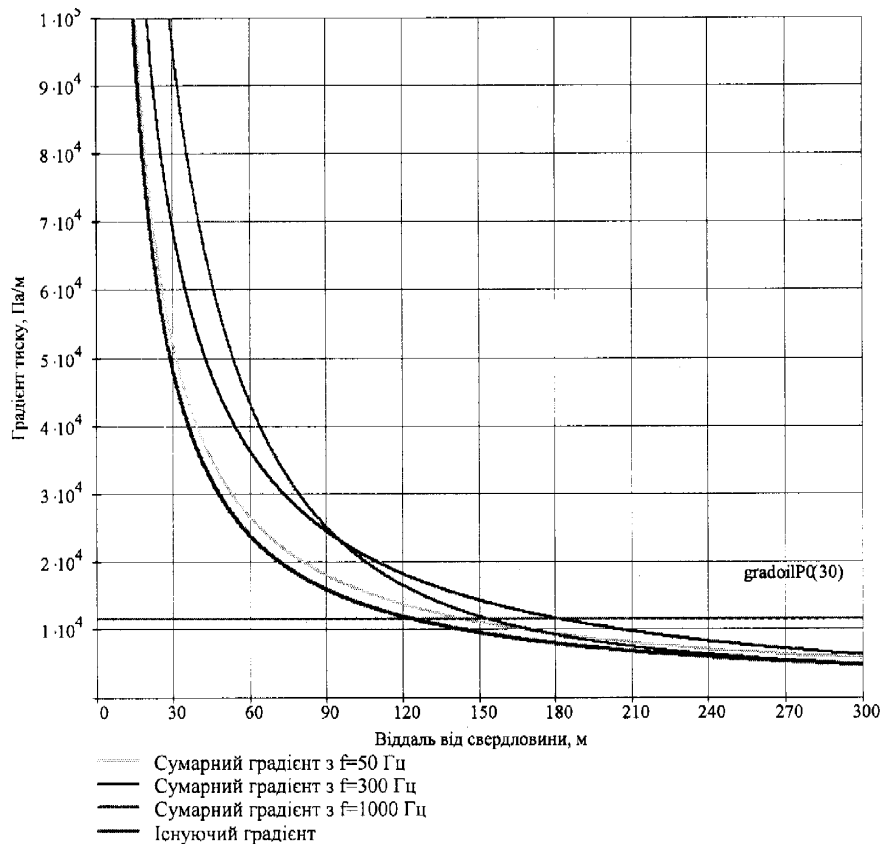


Рисунок 2.41 – Сумарні градієнти в пласті під дією пружних коливань на ділянці 0,1-300 м для значення вибійного тиску $P_B = 8$ МПа та граничний градієнт тиску для нафти в колекторі проникністю 30 мД

Отже можемо зробити висновок, що хвильова дія дозволяє збільшити відстань ефективної дії існуючого в пласті градієнта гідродинамічних тисків на 30-60 метрів в залежності від властивостей нафти, а також як уже зазначалось вище і в роботах [128,129,133], при довготривалому впливі акустичними хвилями на пласт відбувається зниження граничної напруги зсуву, як наслідок збільшення рухливості і зменшення стійкості системи.

Висновки до другого розділу

Проведено оцінку характеру та коефіцієнту поглинання пружних хвиль для різних типів гірських порід та запропоновано оптимальні частоти впливу на привибійну та віддалену частину пласта для порід пористістю 1,5, 15, 20, 35, 40%.

Отримано рівняння різночастотної суперпозиції циліндричних пружних хвиль в насиченому середовищі характерному для родовищ нафти і газу та виконано порівняння з існуючим рівнянням розповсюдження циліндричної пружної хвилі в цьому пласті.

Отримано залежність між максимальною та оптимальною відстанню між випромінювачами та частотою при різночастотному випромінюванні для збільшення впливу високочастотними складовими по товщині пласта та оптимального впливу на віддалену частину пласта з одночасним оброблення привибійної зони відповідно.

Коливання меніску на межі поділу двох фаз внаслідок дії пружних коливань сприятиме подоланню капілярного тиску.

Ефект додаткового розгазування нафти внаслідок впливу пружними коливаннями найкраще використовувати за допомогою низьких частот при розробці нафтового родовища на завершальній стадії за умови повного виділення газу при даному тиску. Таким чином енергія додатково виділеного газу буде допоміжною рушійною силою для покращення фільтрації.

Найбільш доцільним для впливу на ПЗП буде використання коливань високочастотного діапазону. Результатом сумісної роботи двох градієнтів буде подолання граничної напруги зсуву КДС з невеликими значеннями τ_0 , причому, а також при довготривалому впливі акустичними хвилями на пласт відбувається послаблення структурної сітки КДС із значно вищими значеннями τ_0 і подальше зниження граничної напруги зсуву, як наслідок збільшення рухливості і зменшення стійкості системи.

Найбільш доцільним для впливу на віддалену частину пласта є використання коливань низькочастотного діапазону. Встановлено, що хвильова дія дозволяє збільшити відстань ефективної дії існуючого в пласті градієнта гідродинамічних тисків на 30-60 метрів в залежності від властивостей неньютонівської нафти.

РОЗДІЛ 3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ІМПУЛЬСНО-ХВИЛЬОВОЇ ДІЇ НА НАФТОГАЗОНАСИЧЕНІ ПОРОДИ

3.1 Розроблення методики і обладнання для оцінки інтенсивності пружних коливань в насиченій гірській породі

Для дослідження характеру і процесу розповсюдження пружних необхідно мати пристрої і методи для вимірювання параметрів акустичних коливань, які надходять від джерела імпульсів.

Пристрої для вимірювання інтенсивності пружних коливань на різних частотах є малодоступними і виготовляються за великі кошти по спеціальних замовленнях, а готові комплекси для вимірювання мають високу вартість. В таких умовах виникла потреба у створенні із доступних матеріалів давачів сигналу і реєструючих приладів.

Технічну проблему складає мікрофон, що призначений для прийому слабких коливань в рідині під значним тиском. Найбільш доступним і таким, що відповідає необхідним параметрам для створення геофона, виявився електретний мікрофон МКЭ-389-1.

Для забезпечення його роботи у рідкому середовищі виготовлений непроникний корпус з пружними стінками, що можуть передати пружні коливання в рідині через повітря в середині корпусу до мікрофону (рисунок 3.1). Так як на шляху коливань знаходиться жорстка оболонка, яка частково відбиває, а частково пропускає коливну енергію, то чутливість мікрофона від цього може змінитись.

Для визначення результатів дії акустичних імпульсів на пласт необхідно знати інтенсивність, яку несуть в даному середовищі ці імпульси (Вт/см^2). Для цього необхідно провести калібрування геофона за допомогою мікрофона з

відомими характеристиками розміщеного поряд і програмного забезпечення SpectraPLUS.

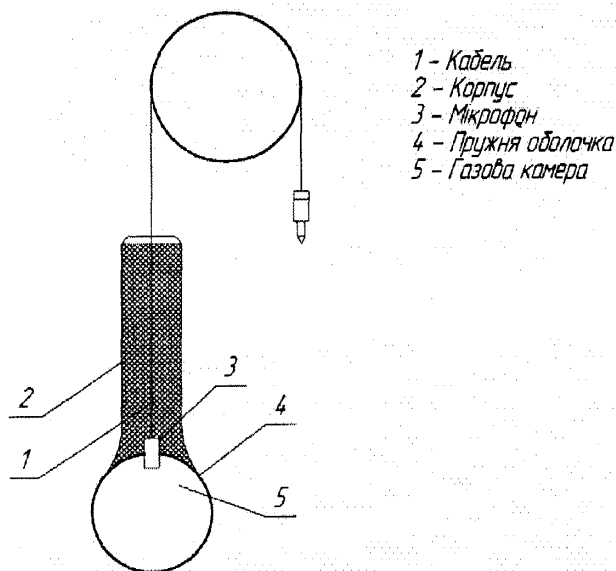


Рисунок 3.1 – Принципова схема геофона

Лабораторні вимірювання проводились в наступній послідовності.

Після визначення відносної чутливості геофону проводились лабораторні дослідження з метою оцінки його чутливості через водне середовище. Для цього геофон розміщали у воді, а до води підводили джерело періодичних імпульсів тиску. Імпульси отримані геофоном (рисунок 3.2) перетворювались в електричний сигнал і передавались на реєструючий прилад (програмне забезпечення SpectraPLUS).

В Інституті фізики Землі АН СРСР і Кубанському державному університеті в 70-80-і роки було систематизовано багаторічні спостереження за сейсмічною активністю різних ділянок Землі з метою теоретичного обґрунтування можливості спрямованої сейсмічної дії з поверхні на нафтові пласти. Це сприяло створенню відносно потужних поверхневих віброджерел-віброплатформ, призначених для

вібраційного "прослуховування" Землі. Подібні джерела працюють у діапазоні частот від 5 до 100 Гц і можуть розвивати зусилля в імпульсі до 10^6 Н [60,138].

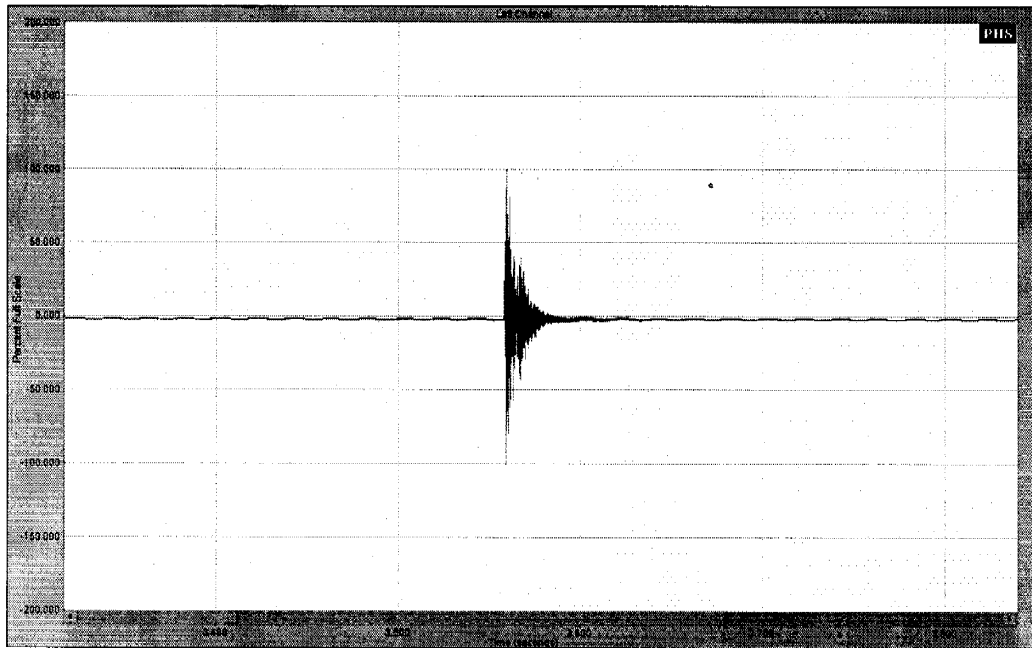


Рисунок 3.2 – Приклад реєстрації імпульсів програмою SpectraPLUS

Для розрахунку необхідних параметрів генераторів пружних коливань необхідно знати коефіцієнт затухання пружної хвилі у поровому середовищі конкретного пласта. Існуючі літературні дані про коефіцієнти затухання пружних коливань у різних пластах-колекторах [105], пов'язані з дією на пласт пружними коливаннями певної визначеної частоти (здебільшого понад 1000 Гц).

3.2 Визначення коефіцієнта поглинання пружних хвиль в насиченій гірській породі в поверхневих умовах

Методика проведення експериментальних досліджень.

Дослідження проводились на менілітовому водонасиченому відслоненні з довжиною пластів по горизонталі 30 метрів (рисунки 3.3,3.4).

Як джерело імпульсу тиску приймали удар металевого циліндра діаметром 6 см і масою 4 кг із циліндричною торцевою поверхнею після падіння його з

висоти 1 м на вибрану ділянку поверхні пласта, що є зручним для визначення інтенсивності імпульсу в точці удару.

Для оцінки інтенсивності імпульсу в точках, розташованих на певних відстанях від джерела імпульсів тиску використовувались розроблені геофони. Для реєстрації і запису сигналу застосовували програму SpectraPLUS. Кількість експериментів у кожній точці приймання сигналу становила 10.

Експериментальні дослідження проводились у такій послідовності:

1 Давач встановлювався в місці приймання сигналу від джерела імпульсу тиску (рисунок 3.4).

2 Імпульси тиску створювались на відстанях 7 і 12 м від точки встановлення давача.

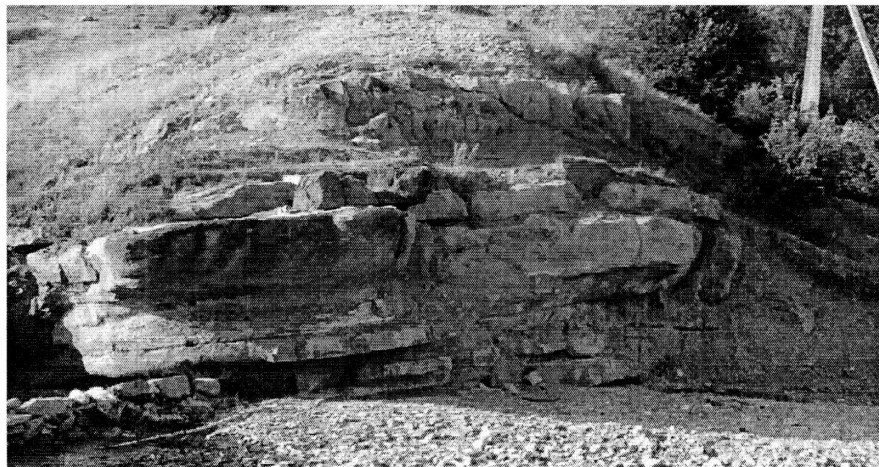


Рисунок 3.3 – Менілітове відслонення в районі Битківського нафтового родовища

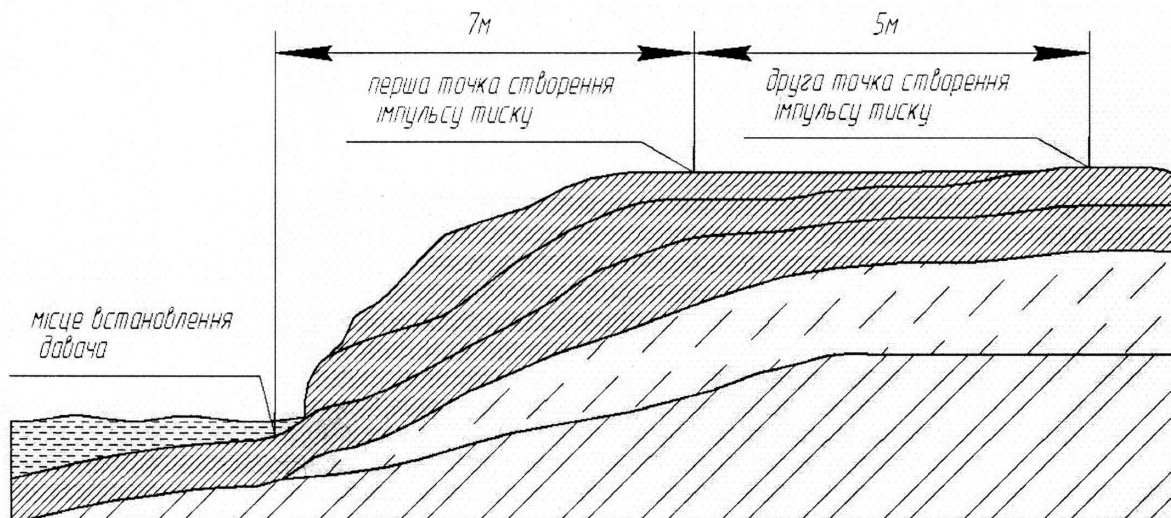


Рисунок 3.4 – Менілітове відслонення, схематичне зображення

3 Прийнятї давачем сигнали передавались до переносного комп'ютера і записувались в базу даних програми SpectraPLUS (рисунки 3.5,3.6).

Визначення коефіцієнта поглинання пружних коливань.

Приймаючи товщину пласта рівною 2 м, визначимо відстані від першої і другої точки створення імпульсів тиску до давача :

$$x_1 = \sqrt{7^2 + 2^2} = 7,28 \text{ м}; \quad x_2 = \sqrt{12^2 + 2^2} = 12,17 \text{ м}.$$

Відстань між точками створення імпульсів буде рівною:

$$x = x_2 - x_1 = 4,89 \text{ м}.$$



Рисунок 3.5 – Амплітуда імпульсу на відстані X_1 від точки удару

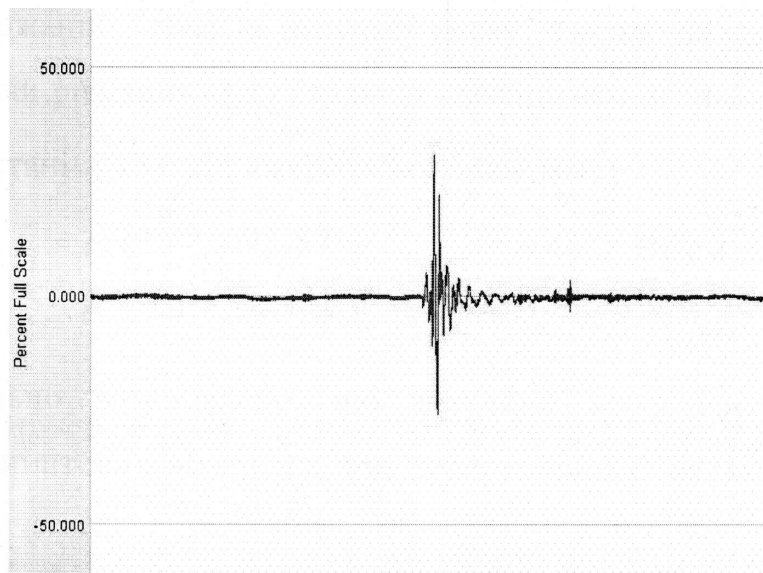


Рисунок 3.6 – Амплітуда імпульсу на відстані X_2 від точки удару

Коефіцієнт поглинання знаходимо як співвідношення амплітуд імпульсів та відстані між точками створення імпульсів [139] :

$$A_2 = A_1 e^{-\alpha x}, \quad (3.1)$$

де A_1, A_2 – значення амплітуди відповідно на відстані x_1, x_2 від джерела імпульсу тиску; α – коефіцієнт поглинання.

Значення амплітуд A_1, A_2 визначимо з рисунків 3.5 та 3.6.

$$A_1 = 39 \text{ умовних одиниць};$$

$$A_2 = 31 \text{ умовних одиниць}.$$

Коефіцієнт поглинання буде рівний:

$$\alpha = -\frac{\ln\left(\frac{A_2}{A_1}\right)}{x} = -\frac{\ln\left(\frac{31}{39}\right)}{4,89} = 0,047 \text{ м}^{-1}.$$

Енергію імпульсу тиску в точці удару можна визначити за формулою:

$$E = mgh = 4 \cdot 9,81 \cdot 1 = 39,24 \text{ Дж},$$

де m – маса циліндра; h – висота падіння циліндра.

Інтенсивність імпульсу тиску у місці удару визначаємо за формулою:

$$I = \frac{N}{S} = \frac{E}{t \cdot S} = \frac{4 \cdot E}{t \cdot \pi \cdot d^2} = \frac{4 \cdot 39,24}{0,015 \cdot 3,14 \cdot 6^2} = 92,57 \text{ Вт/см}^2,$$

де t – час удару, одержаний з графіка імпульсу тиску; S – площа удару, см^2 .

Використовуючи рівняння (3.1) і знаючи коефіцієнт поглинання, знаходимо інтенсивність на відстані x_1, x_2 від джерела імпульсу тиску.

$$I_1 = I \cdot e^{-2\alpha x_1} = 92,57 \cdot e^{-2 \cdot 0,047 \cdot 7,28} = 46,7 \text{ Вт/см}^2;$$

$$I_2 = I \cdot e^{-2\alpha x_2} = 92,57 \cdot e^{-2 \cdot 0,047 \cdot 12,17} = 29,5 \text{ Вт/см}^2.$$

Експериментально встановлено, що значення коефіцієнта поглинання пружних хвиль в менітових відкладах при поверхневих умовах рівне $0,047 \text{ м}^{-1}$ [140].

3.3 Дослідження впливу пружних коливань на зміну фільтрації нафтоводної суміші в насипній моделі пласта

На сьогоднішній день проведено низку теоретичних та експериментальних досліджень із впливу пружних коливань на взаємозв'язок флюїду і поверхні колектора, від якого залежить зміна швидкості фільтрації флюїду в нафтогазонасичених породах [53,54,109]. Основна частина досліджень спрямована на оцінку впливу поля пружних коливань, на реологічні параметри флюїду. Так, в роботі [54] розглядається зміна в'язкості трансформаторного масла під дією низькочастотних пружних коливань з подальшим продовженням ефекту протягом певного періоду часу, який залежить від тривалості впливу. Також авторами [54] розглядалось питання, щодо впливу коливань на поверхневий натяг рідин, результати експериментів свідчать про зміну поверхневого натягу та залежність ефекту від тривалості дії.

В роботі [141] досліджується вплив ультразвукових коливань на реологічні характеристики в'язко-пружної рідини. Автором побудовані реологічні криві течії модельованої рідини при різних амплітудах ультразвукових коливань. Встановлено, що в'язкість та пружність рідини зменшується за рахунок руйнування структурних зв'язків певних видів.

Вплив вібрації на реологічні властивості в'язко-пластичних рідин досліджували в роботі [142]. Авторами виявлено вплив частоти коливань на властивість глинистих та цементних розчинів у діапазоні частот від 30 до 1000 Гц, а також запропоновано версію, що вібрація діє на почергову зміну взаєморозміщень часточок піску або цементу та викликає загальне послаблення сил міжмолекулярного зчеплення і, як наслідок, підвищення плинності суміші.

Робота [143] присвячена дослідженню акустичного впливу на інтенсифікацію теплообміну в газах та рідинах. Так авторами було отримано приріст значення коефіцієнта тепловіддачі, отриманому в звуковому полі у діапазоні від 1,05 до 20 раз. Такі розходження пов'язані з різними умовами

експериментів і з різними підходами до фізичної моделі процесу, який використовується при обробці результатів.

Недостатньо вивченими є механізми взаємодії поля пружних коливань із пористим нафтоводонасиченим середовищем пласта під час фільтрації нафтоводяної суміші у ньому.

Метою експериментів було дослідження і встановлення якісного і кількісного впливу пружних коливань на зміну фільтрації нафтоводяної суміші в насипній моделі пласта.

Методика.

Дослідження проводились на спеціально створеному експериментальному устаткуванні, зображеному на рисунку 3.7. Устаткування складається з металевого циліндра 10, обмеженого текстолітовими дисками 6 і 11. Циліндр 10 – пористе середовище, 40% якого насичено нафтою, а решта – пластовою водою. Для створення стабільного надлишкового тиску (імітація гірського тиску) на модель пласта використовується ємність з водою 4, розміщена на висоті H_1 . Триплив нафти та пластової води в насипну модель пласта здійснюють з допомогою ємностей 3 та 5, які розміщені відповідно на висотах H_2 та H_3 , градієнт гідродинамічних тисків складає 65 кПа/м. Для розмежування води з ємності 4 та пористого середовища 9 слугує мембрана 7. Тиск над мембраною фіксується манометром 8. Вихід флюїду з моделі пласта 9 здійснюється крізь центральний отвір 12. Створення в насипній моделі пласта поля пружних коливань відбувається за рахунок роботи генератора 15, регулювання параметрів якого здійснюється за допомогою ноутбука з програмним забезпеченням 1.

Для моделі пористого середовища 9, використовувався пісок із фракціями 0,10 - 0,4 мм, проникність моделі складала $0,5 \text{ мкм}^2$. Пісок попередньо просіювався, промивався розчином соляної кислоти, а потім дистильованою водою. Ємність 10 після заповнення піском втрамбовували механічним вібратором протягом 1 години.

Для насичення пористого середовища використовувались зразки нафти (коефіцієнт динамічної в'язкості 50 мПа·с при 20°C) та пластової води (мінералізація 200 г/л).

Ємності 3 і 5 для підтримання усталеного тиску та швидкості надходження флюїду в пористе середовище виконані у вигляді посудини Маріотта.

В якості генератора використовувався п'єзогенератор імпульсів тиску ударної дії на основі п'єзокераміки ЦТС-19. Частота повторення імпульсів генератора 15 становила 1 Гц, спектр імпульсу вмещував гармоніки від 10 Гц до 40 кГц.

Експериментальні дослідження із впливу пружних коливань на зміну фільтрації нафтоводяної суміші в насипній моделі пласта проводились в такій послідовності:

1. Гідродинамічно з'єднували ємності 3 і 5 з поровим середовищем 9; протягом 3 годин здійснювали фільтрацію нафтоводяної суміші крізь центральний отвір 12 до встановлення усталеного режиму фільтрації з незмінним співвідношенням нафта-вода в відібраній пробі на рівні 30% і 70% відповідно.

2. При усталеній фільтрації нафтоводяної суміші проводили відбір проби суміші об'ємом 10 см³ і визначали відсотковий склад нафти і пластової води у відібраній пробі. Для підвищення точності вимірювань відбір повторювали 20-25 раз.

3. Вмикали генератор імпульсів 15 для дії на насипну модель пласта і протягом його роботи проводили відбір проби суміші об'ємом 10 см³ та визначали відсотковий склад нафти і пластової води у відібраній пробі, аналогічно, як і в попередньому випадку відбір повторювали 20-25 раз.

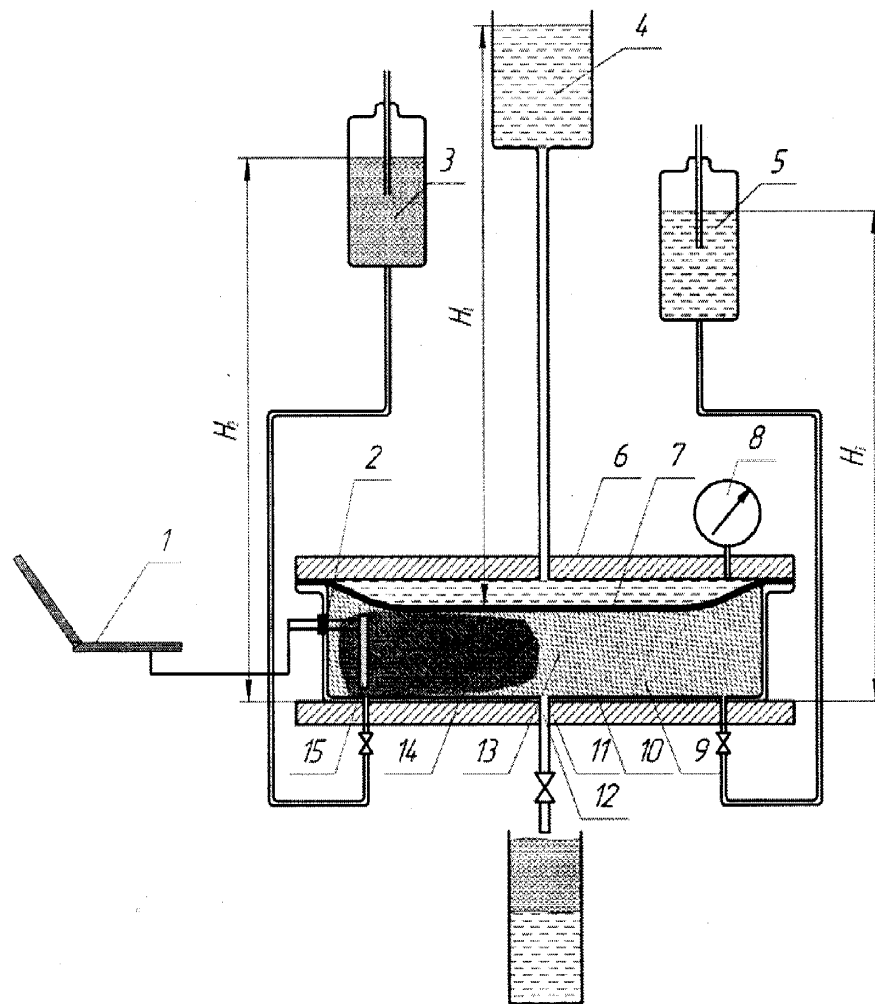
4. Для наочного представлення результатів досліджень побудована графічна залежність (рисунок 3.8) зміни відсоткового співвідношення нафти і пластової води від накопиченого об'єму відібраних проб.

Аналізуючи побудовані графіки на рисунку 3.8, можна зробити висновки:

1. Фільтрація нафтоводяної суміші без впливу поля пружних коливань відбувається з відсотковим співвідношенням нафти і пластової води в межах 30% і 70%.

2. Після увімкнення генератора 15 спостерігається зміна відсоткового співвідношення у відібраних пробах у бік збільшення частки нафти відносно початкового значення.

3. Через годину після увімкнення генератора відсоткове співвідношення у відібраних пробах нафти і пластової води стабілізувалось на рівні 55% і 45% відповідно.



1 – ноутбук з програмним забезпеченням, 2 – герметичне ущільнення, 3 – ємність з нафтою, 4 – ємність з водою, 5 – ємність з пластовою водою, 6, 11 – текстолітові диски, 7 – гумова мембрана, 8 – манометр, 9 – насипна модель пласта, 10 – металевий циліндр, 12 – центральний отвір, 13 – водонасичена частина моделі пласта, 14 – нафтонасичена частина моделі пласта, 15 – п'єзовипромінювач

Рисунок 3.7 – Схема експериментального устаткування

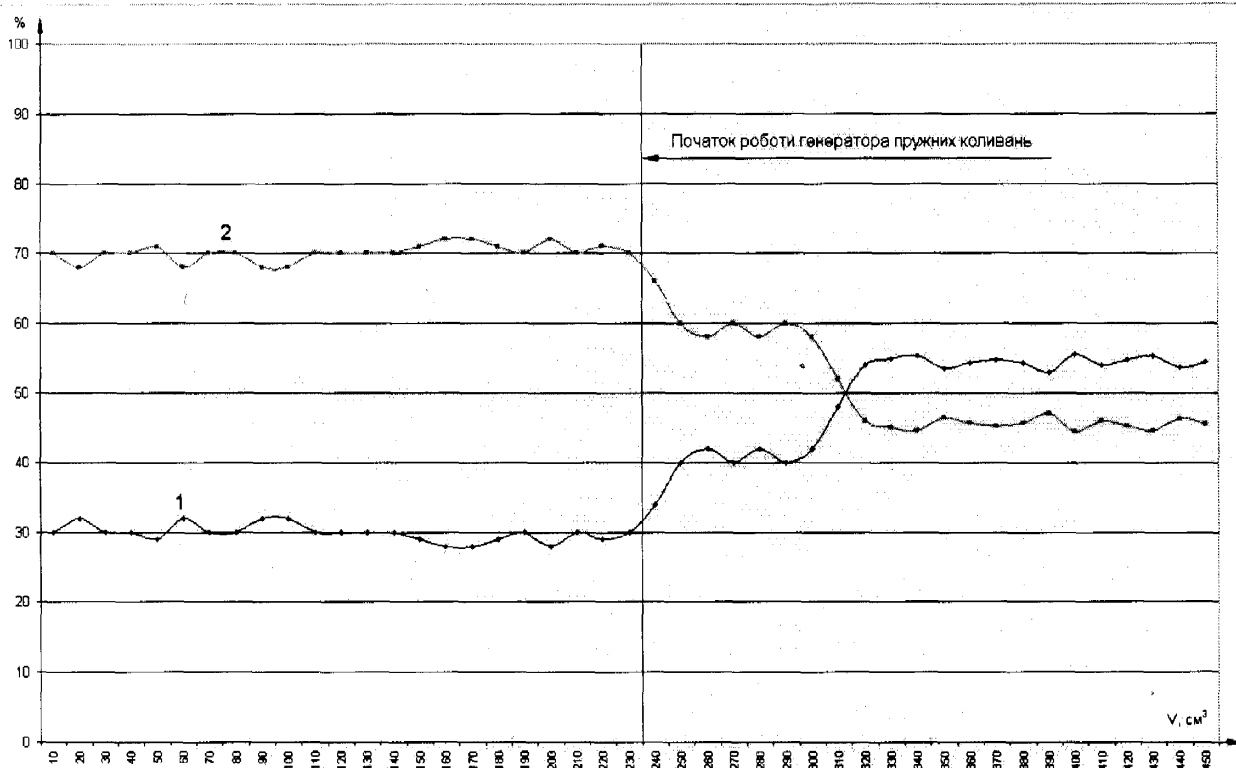


Рисунок 3.8 – Графік зміни відсоткового співвідношення нафти (1) і пластової води (2) від накопиченого об'єму відібраних проб

Фізичні ефекти, які виникали в ході проведення експериментів при створенні в насипній моделі пласта поля пружних коливань, завдяки яким були одержані результати:

- зменшення ефективного тертя між породою і флюїдом, як наслідок підвищення рухливості рідини;
- внаслідок проходження пружної хвилі спостерігаються фази розтягу та фази стиску, що в парі вібрація скелету і рідини викликає ефект вібраційного насосу;
- динамічна зміна форми меніска на межі поділу двох фаз, як наслідок динамічна зміна капілярного тиску.

Результати експериментальних досліджень вказують на вплив поля пружних коливань під час фільтрації нафтоводяної суміші, а саме збільшення відсоткового співвідношення нафти на виході моделі з 30% до 55% [144].

Експериментальні дослідження з відмивання залишкової нафти із пласта проводились у такій послідовності:

1. На експериментальній установці перекидали кран між ємністю із нафтою 8 і моделлю пласта, запобігаючи доступу нафти у модель; кран для подавання пластової води 9 відкритий.

2. Проводили вимірювання часу фільтрації 10 см^3 флюїду до моменту, поки у пробах буде відсутня нафта (1,5..2 години).

3. Включали генератор імпульсів і продовжували вимірювання поки не з'являлась у пробі нафта, після чого проводили ще 10..15 замірів і будували залежність вмісту в пробі води і нафти від об'єму прокачування води (рисунок 3.9).

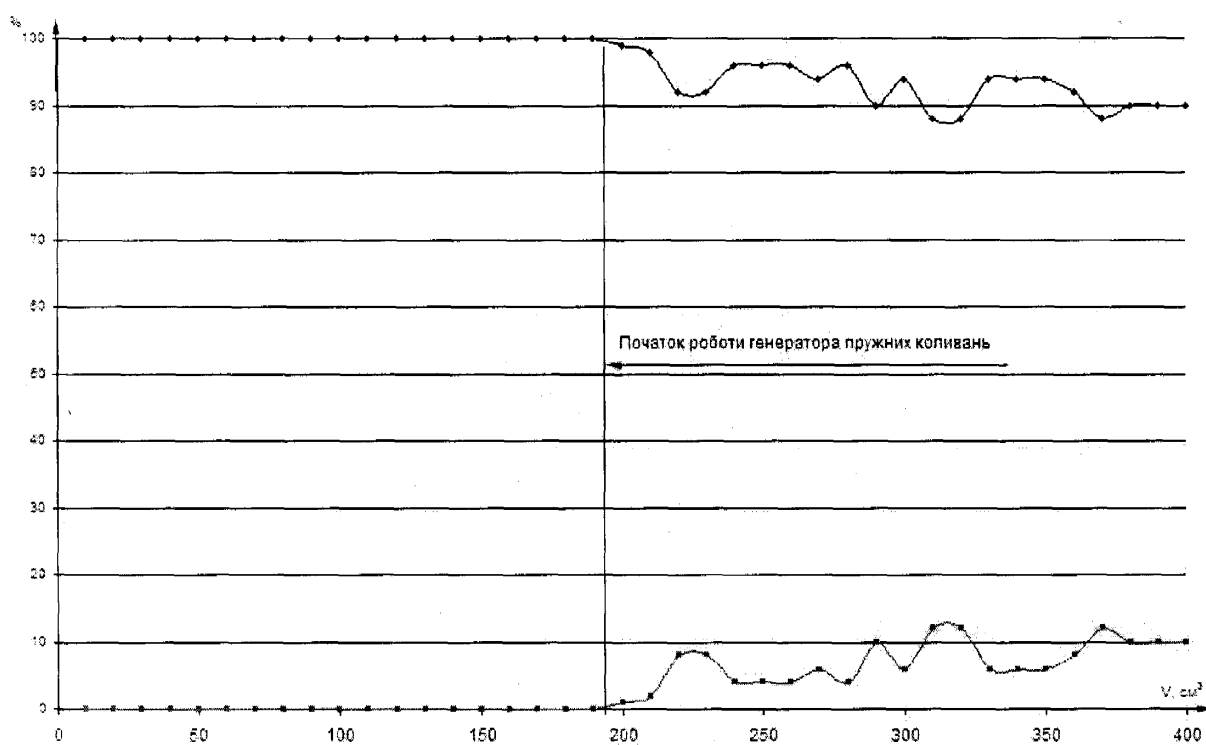


Рисунок 3.9 – Графік зміни відсоткового співвідношення нафти (1) і пластової води (2) від накопиченого об'єму відібраних проб внаслідок довідмивання

Аналізуючи результати експериментів зображені на рисунку 3.9 можна зробити висновок, що довідмивання нафти з поверхні твердого тіла у пористому середовищі під дією пружних коливань відбувається за рахунок різниці швидкостей розповсюдження пружної хвилі у породі, нафті і воді та динамічній

зміни форми меніска на межі поділу двох фаз, як наслідок зміни капілярного тиску [145,146].

У першому і другому циклі експериментальних досліджень використовувався п'єзокерамічний генератор імпульсів тиску. Знаючи, що товщина пластини складала $\delta=8$ мм, а швидкість поширення $c=3120$ м/с, знаходимо власну частоту f випромінювача за формулою [45]:

$$f = \frac{c}{2 \cdot \delta} = \frac{3120}{2 \cdot 8 \cdot 10^{-3}} = 195 \text{ кГц},$$

Згідно з [45] інтенсивність одностороннього п'єзокерамічного випромінювача визначають за формулою:

$$I = \frac{f^2 \cdot U_{ef}^2}{10}, \quad (3.2)$$

де I – інтенсивність одностороннього п'єзокерамічного випромінювача, Вт/см²; f – частота випромінювання, МГц, в нашому випадку 0,195 МГц; U_{ef} – прикладена ефективна напруга, кВ, в нашому випадку 1,6 кВ.

Отже інтенсивність акустичного випромінювання складала $\approx 0,01$ Вт/см². Варто зазначити, що в роботах Сургучева М.Л. та Кузнецова О.Л. [91, 109] зазначається, що подібні ефекти можуть спостерігатись при інтенсивностях випромінювання понад 0,1 Вт/см², тобто в 10 раз більше.

3.4 Дослідження процесу додаткового виділення газу з дегазованої нафти внаслідок хвильової дії

У роботі [121] стверджується, що ультразвукові коливання в газонасиченій нафті призводять до підвищення тиску насичення, наслідком чого є інтенсифікація виділення газу з цієї нафти і концентрування газу у вигляді облямівки мікробульбашок на межі між нафтою та водою, що підвищує ефективність процесу витіснення.

У роботі [122] наведено, що ініціюючим чинником у механізмі впливу ультразвукових пружних коливань на режими роботи видобувних свердловин є

первинне вивільнення з нафти газової фази, наступна затримка (гістерезис) зворотнього розчинення виділеної газової фази з одночасним її ізобаричним розширенням та просуванням під впливом постійно діючого градієнта гідродинамічних тисків в напрямку видобувних свердловин за принципом пластового ліфтування.

Вказані дослідження проводились із використанням ультразвукових частот (вище 20000 Гц). У зв'язку зі значним поглинанням пружних коливань цих частот у поровому середовищі пласта, застосування їх для впливу на віддалену частину пласта є проблематичним. Нами проведено дослідження із впливу на процеси розгазування нафти пружних коливань у діапазоні частот 50-500 Гц. Нижньою межею вказаного діапазону є пружні коливання сейсмічного діапазону частот, використання яких для інтенсифікації процесів нафтовилучення є можливим на значно більших відстанях від генератора пружних коливань, ніж ультразвукових частот.

Методика.

Експериментальні дослідження із впливу пружних коливань на проби нафти і на нафтонасичені насипні моделі пласта проводились на створеному нами експериментальному устаткуванні, зображеному на рисунку 3.10. Устаткування складається з камери (розмір 150x50x60 мм) 1, штатива 2, кранів 3, 8, 11, голки 4, ємності з нафтою 5 (густина 886 кг/м³), ущільнення 6, манометра 7, звукопоглинача 9, наповнювача камери 10, генератора 12, ноутбука з необхідним програмним забезпеченням 13.

Порядок проведення експериментів.

а) Експерименти із впливу пружних коливань на проби нафти в камері:

Попередньо камеру 1 наповнювали пластовою водою (мінералізація 200 г/кг) 10. Ємність із нафтою 5, тиск в якій становить 18 кПа, з'єднували з камерою 1, шляхом проколювання ущільнення 6 голкою 4. При відкритих кранах 3 і 11 проводили витіснення пластової води нафтою з ємності 5 до початку виходу нафти через кран 11. Крани 3 і 11 перекривали, а кран 8 відкривали і починали знімати покази манометра через рівні інтервали часу. Спостереження за

збільшенням тиску в камері проводили до встановлення стабільного значення тиску, близького до попереднього значення в ємності з нафтою 5. Для достовірності результатів камеру залишали на 24 години щоб упевнитись, що тиск у ній залишається на одному рівні.

Після стабілізації тиску в камері вмикали генератор акустичних коливань 12 з певною домінуючою частотою і фіксували додаткове збільшення тиску манометром 7 у камері 1 через рівні інтервали часу. Спостереження за збільшенням тиску в камері 1 проводили до встановлення стабільного значення тиску. Описана послідовність виконувалась для кожного з десяти експериментів. Вплив на проби нафти проводився на попередньо відібраних 4 домінуючих частотах. Газовміст для всіх проб нафти був однаковий. Температура під час усіх експериментів становила 20 °С.

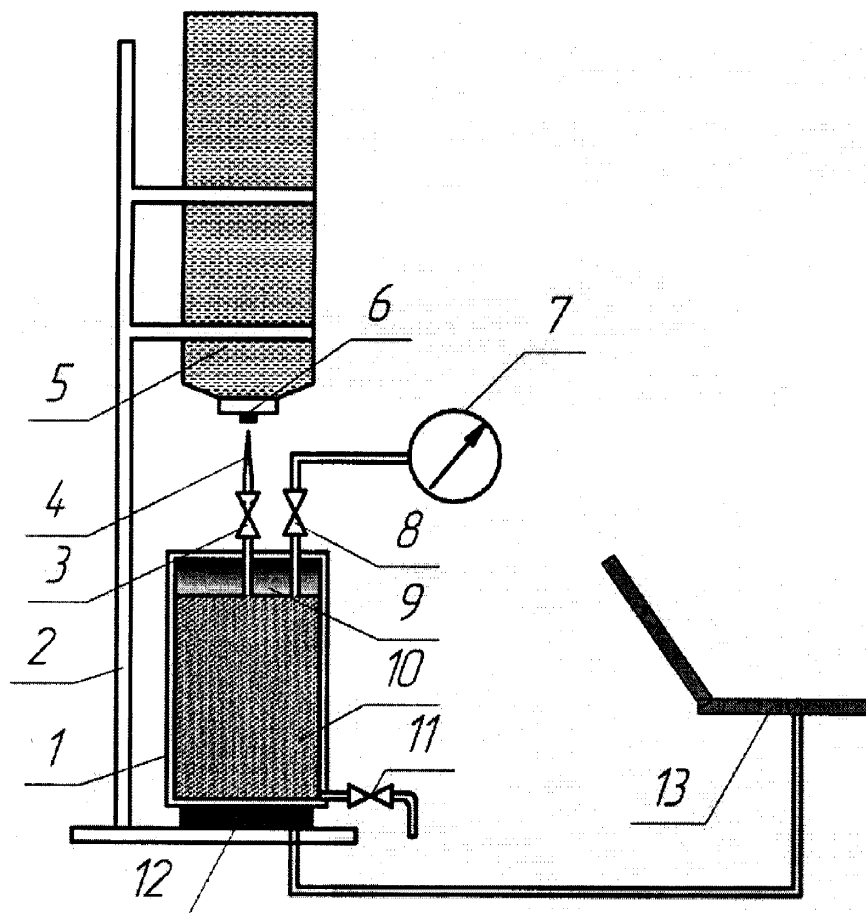


Рисунок 3.10 – Схема експериментального устаткування для дослідження процесу розгазування нафти

Результати експериментів зображено на рисунках 3.11, 3.13.

б) Експерименти із впливу пружних коливань на нафтонасичені насипні моделі пласта:

Для дослідів, як модель пористого середовища 10, приймався пісок із фракціями 0,100 - 0,025 мм, проникність моделі складала $0,5 \text{ мкм}^2$. Пісок попередньо просіювався, промивався розчином соляної кислоти, а потім дистильованою водою. Камеру 1 заповнювали підготовленим піском, утрамбовували впродовж 1 години і заливали пластовою водою (мінералізація 200 г/кг). Ємність із нафтою 5, тиск в якій становить 18 кПа, з'єднували з камерою 1 шляхом проколювання ущільнення 6 голкою 4. При відкритих кранах 3 і 11 проводили витіснення пластової води нафтою з ємності 5 до початку виходу нафти через кран 11. Крани 3 і 11 перекривали, а кран 8 відкривали і починали знімати покази манометра через рівні інтервали часу. Спостереження за збільшенням тиску в камері проводили до встановлення стабільного значення тиску, близького до попереднього значення в ємності з нафтою 5. Для достовірності результатів камеру залишали на 24 години щоб упевнитись, що тиск у ній залишається на одному рівні.

Після стабілізації тиску в камері вмикали генератор акустичних коливань 12 з певною домінуючою частотою і фіксували додаткове збільшення тиску манометром 7 у камері 1 через рівні інтервали часу. Спостереження за збільшенням тиску в камері 1 проводили до встановлення стабільного значення тиску. Описана послідовність виконувалась для кожного з десяти експериментів. Вплив на проби нафти проводився на попередньо відібраних 4 домінуючих частотах. Газовміст для всіх проб нафти був однаковий. Температура під час всіх експериментів становила $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Результати експериментів зображено на рисунках 3.12, 3.13.

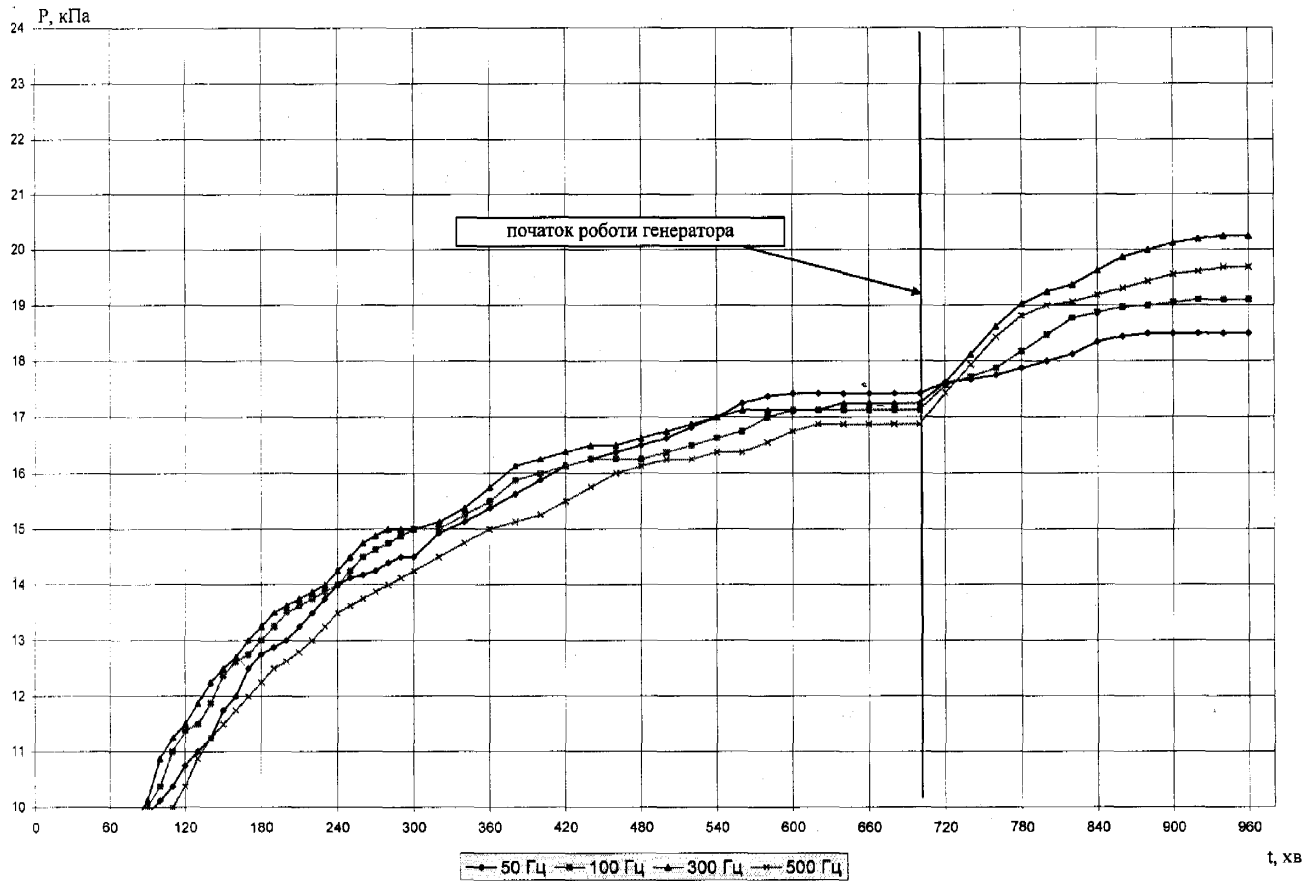


Рисунок 3.11 – Результати впливу пружних коливань на газонасичені проби нафти

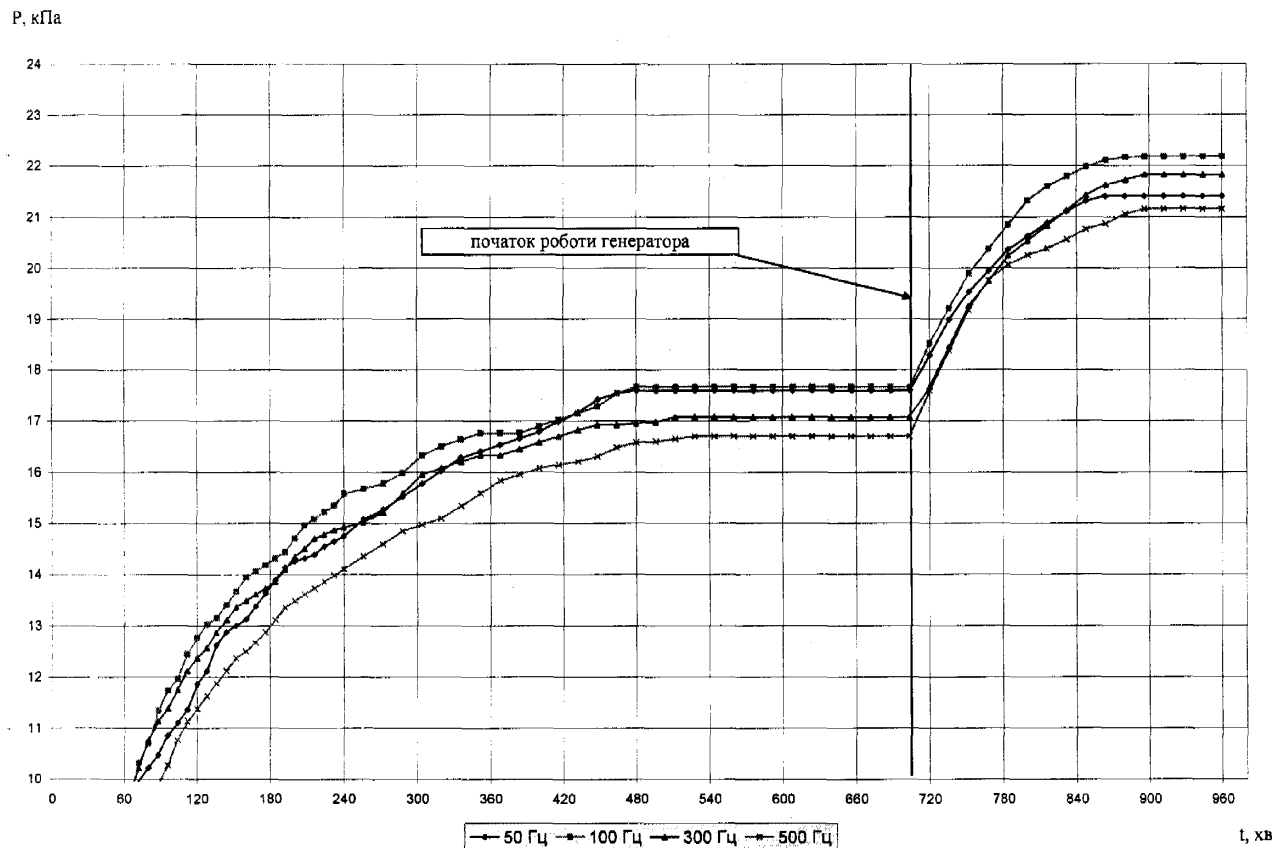


Рисунок 3.12 – Результати впливу пружних коливань на газонасичені проби нафти в насипній моделі пласта

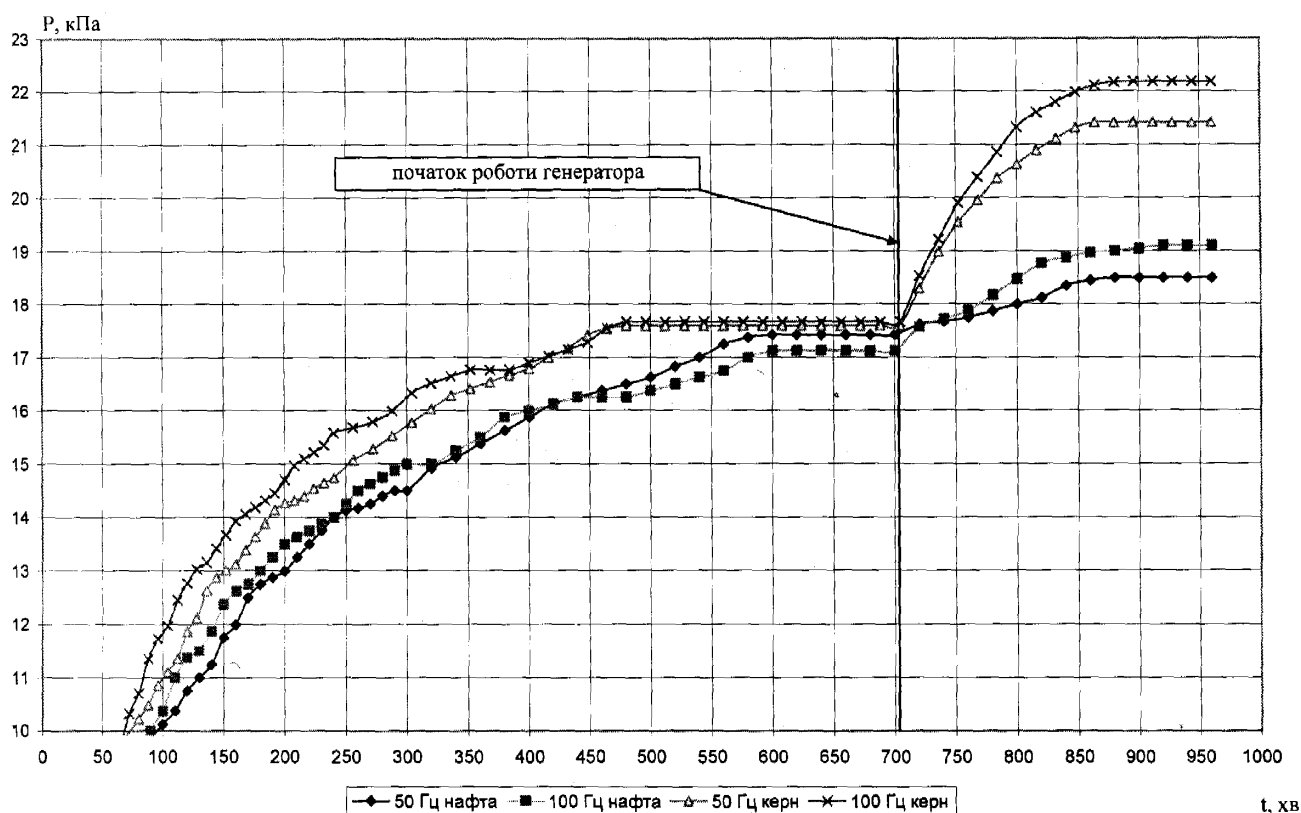


Рисунок 3.13 – Суміщені результати впливу пружних коливань частотами 50 і 100 Гц на газонасичені проби нафти та проби нафти в насипній моделі пласта

На основі аналізу проведених експериментів та побудованих графіків можна зробити такі висновки:

- акустичний вплив на пробу нафти і нафтонасичену насипну модель пласта у діапазоні частот 50-500 Гц призводить до часткового розгазування нафти і, як наслідок, збільшення тиску в камері 1;

- на практиці для інтенсифікації процесів розгазування доцільніше використовувати діапазон частот 50-70 Гц, у зв'язку із незначним поглинанням пружних коливань даного діапазону частот у пористому середовищі пласта [147-149].

3.5 Дослідження процесу розповсюдження та суперпозиції пружних хвиль відмінних частот в насиченому пористому середовищі

Як вже зазначалось в пункті 1, на рівні з гідродинамічними генераторами коливань широкого використання набули технології акустичної обробки привибійної зони продуктивного пласта із використанням високочастотних п'єзокерамічних випромінювачів [73]. Перевага даної технології полягає в тому, що висока інтенсивність пружних коливань досягається за рахунок збільшення частоти випромінювання, а не амплітуди. В той же час з розділу 2 відомо, що хвилі високої частоти характеризуються значними коефіцієнтами поглинання пластом (порядку $1-2 \text{ м}^{-1}$), що робить використання їх на віддальх більше 1,5 м недоцільним. В той же час при використанні випромінювачів тільки низькочастотного діапазону відбувається вплив на віддалену частину пласта, без ефективного оброблення ПЗП, а інтенсивність обробки зменшується на декілька порядків.

Теоретичне обґрунтування можливості комплексного випромінювання, як високочастотних, так і низькочастотних складових із використанням явища биття розглянуто в розділі 2. Для підтвердження можливості утворення різницевої частоти розглянемо фізичну модель насиченого пористого середовища із одночасним створенням в ньому коливань двох частот.

Методика.

Експериментальні дослідження процесу розповсюдження пружних коливань комбінованих частот проводились на створеному нами експериментальному устаткуванні в діапазоні частот 50 Гц – 20 кГц, зображеному на рисунку 3.14. Нижче наведено порядок проведення експерименту на частоті 70 Гц. Устаткування складається з насипної моделі пористого середовища 1, насиченого пластовою водою 2, генераторів пружних коливань 3, розробленого геофона 4, сейсмодавача типу СВ 5. Сигнали для підвищення достовірності отримували від геофона і сейсмодавача по двоканальній лінії і реєструвались на персональному комп'ютері програмою SpectraPLUS.

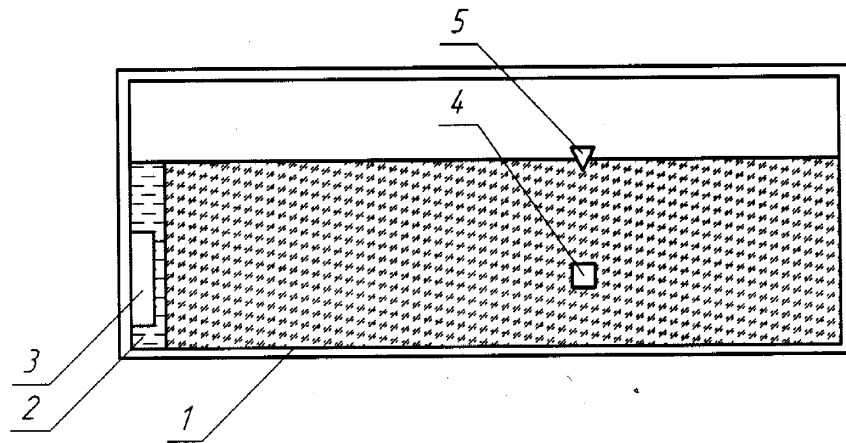


Рисунок 3.14 – Схема експериментального устаткування

Порядок проведення експериментів.

1. За допомогою генераторного модуля програми SpectraPLUS створювали і знімали первинний сигнал випромінювання частотою 70 Гц, з одним і двома джерелами випромінювання (рисунок 3.15).

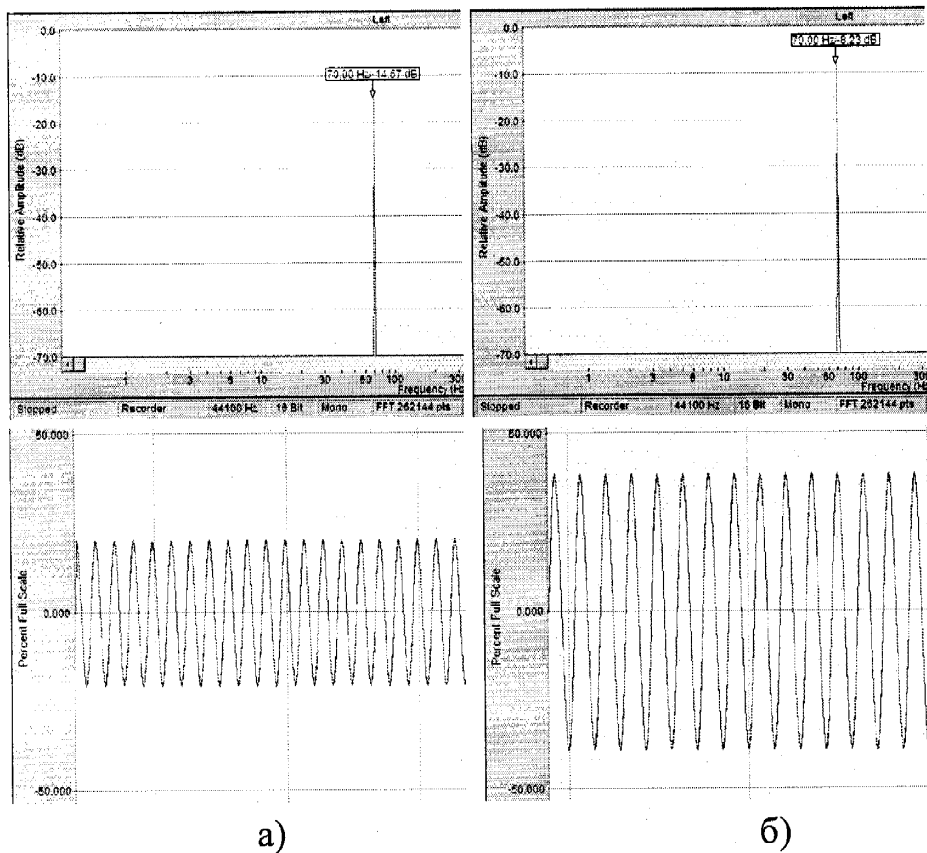
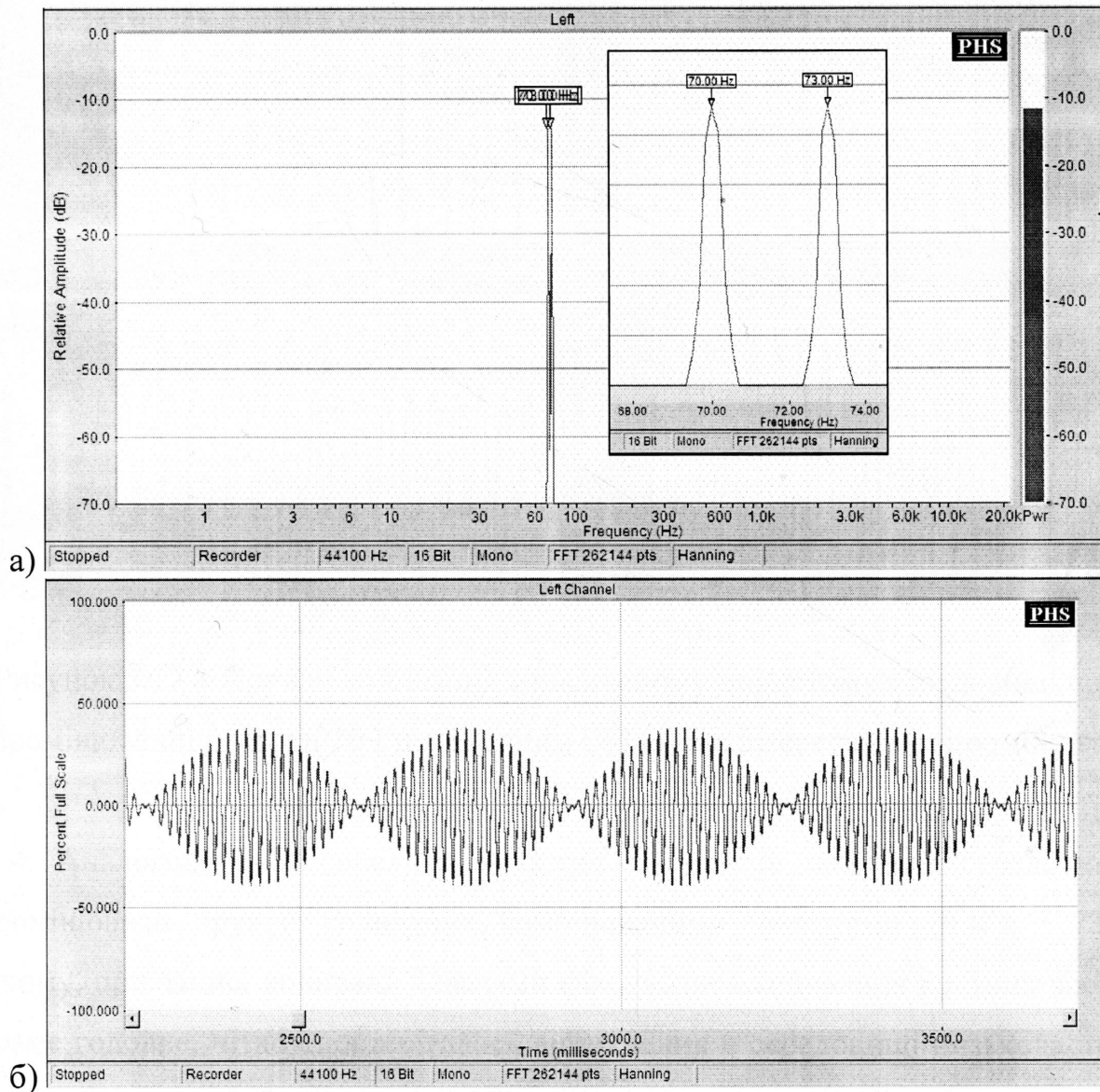


Рисунок 3.15 – Первинний сигнал випромінювання частотою 70 Гц з а) одним і б) двома джерелами випромінювання

2. Аналогічно з попереднім пунктом знімали первинний сигнал випромінювання комбінованих частот двох джерел, які згідно розділу 2 мають

відрізнялись на 5%, і становили відповідно 70 Гц і 73 Гц (рисунок 3.16). Варто зазначити, що в при зніманні первинних сигналів, в спектральному розкладі не відмічались коливання частот відмінних від генерованих.



а)

б)

а) спектральний розклад ; б) первинний сигнал випромінювання в часі

Рисунок 3.16 – Первинний сигнал випромінювання комбінованих частот 70 Гц і 73 Гц

3. За допомогою генераторів пружних коливань 3, на які подавались первинні сигнали, в пористе насичене середовище 1 випромінювали пружні коливання частотою 70 Гц відповідно одним та двома джерелами, які фіксувались давачами 4 та 5 (рисунок 3.17).

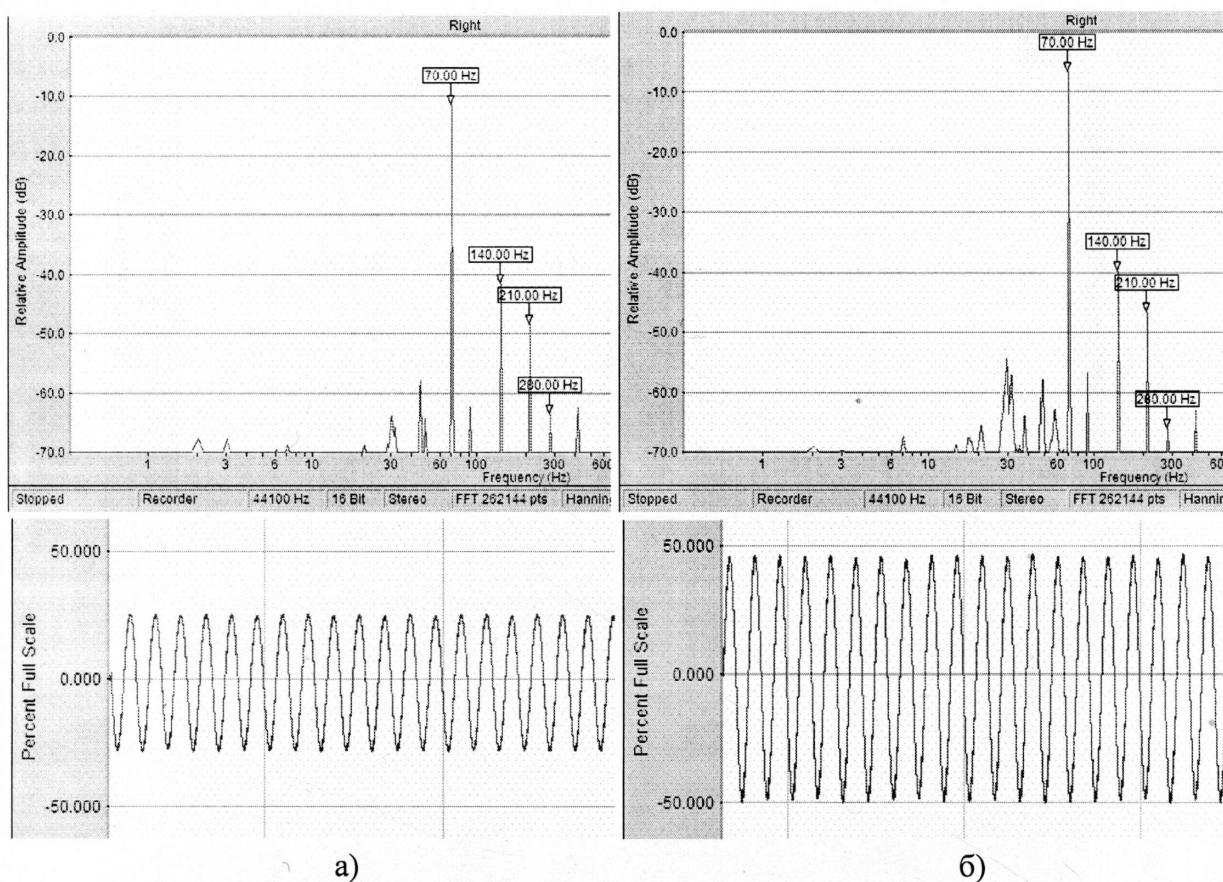


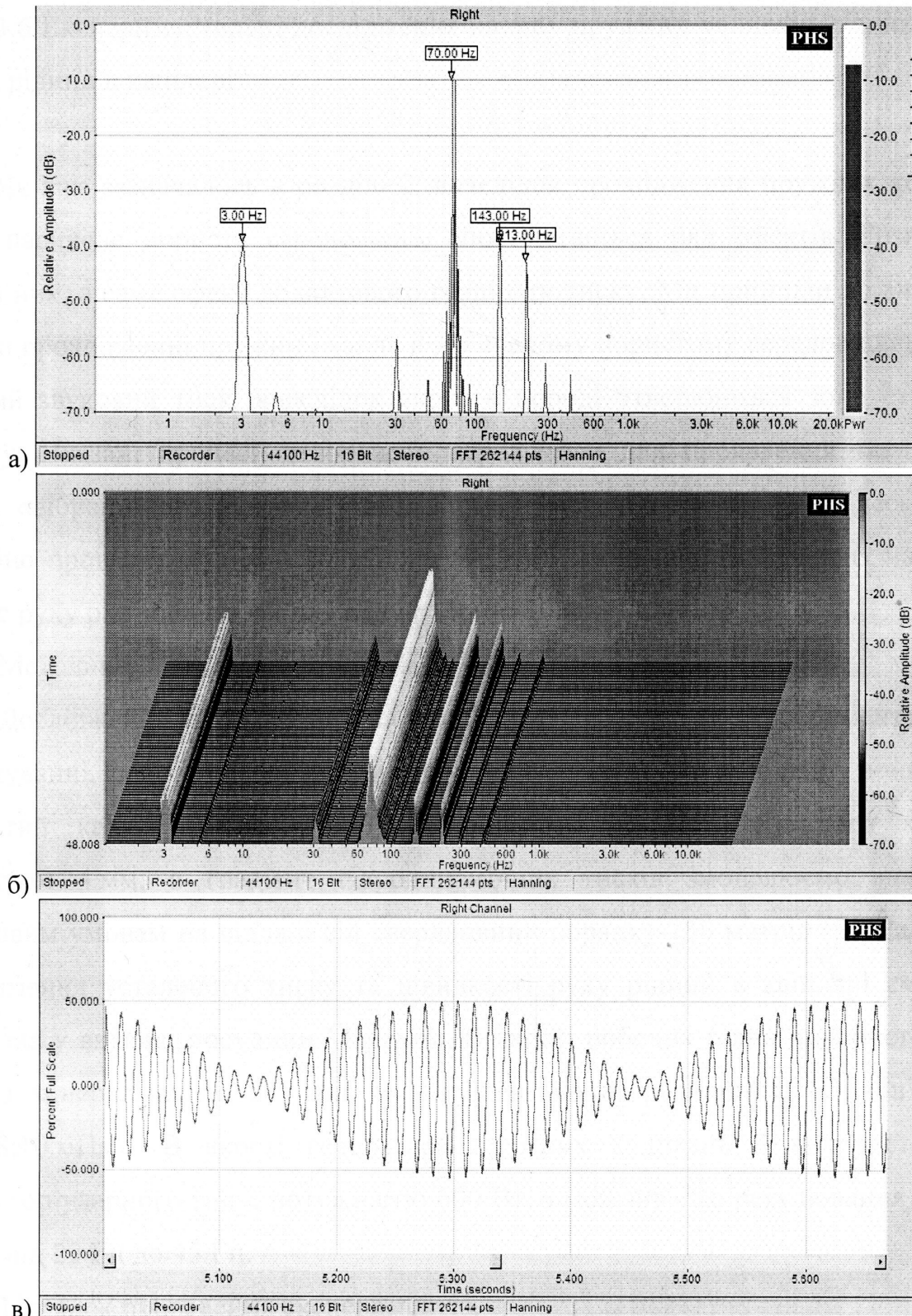
Рисунок 3.17 – Пружні коливання в насиченому пористому середовищі при випромінюванні частоти 70 Гц з а) одним і б) двома джерелами випромінювання

4. Аналогічно з попереднім пунктом, в пористе насичене середовище 1 випромінювали пружні коливання комбінованими частотами 70 Гц і 73 Гц. Причому, при записі коливань датчиками фіксувались коливання кратних частот, і що саме головне, чітко спостерігалось виникнення в середовищі низькочастотної різницевої частоти 3 Гц (рисунок 3.18).

На основі аналізу проведених експериментів можна зробити такі висновки:

- при випромінюванні в пористому насиченому середовищі пружних коливань комбінованих частот виникає низька різницева частота, а також кратні високочастотні складові;

- експериментально підтверджено можливість комплексного випромінювання, як високочастотних, так і низькочастотних складових із використанням явища биття для ряду частот 50 Гц – 20 кГц.



а) спектральний розклад; б) спектральний розклад із зміною в часі;

в) реєстрований сигнал випромінювання в часі

Рисунок 3.18 – Пружні коливання в насиченому пористому середовищі при випромінюванні комбінованих частот 70 Гц і 73 Гц

3.6 Експериментальні дослідження впливу пружних коливань різних частот на рух рідини в капілярі

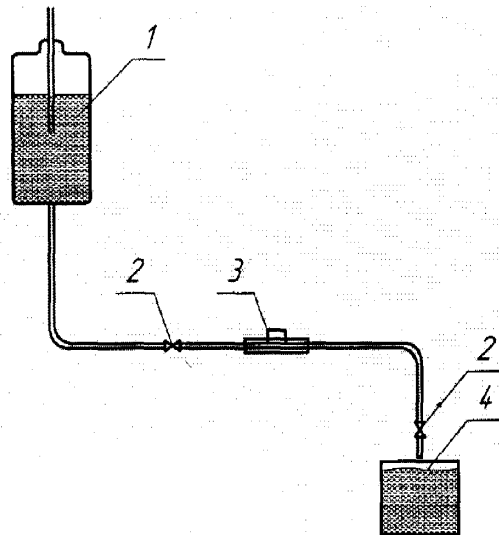
Як вже зазначалось в розділі 2, внаслідок проходження пружних коливань через насичене пористе середовище, спостерігається ряд ефектів. Розглянемо один з них, а саме ефект додаткового градієнту тиску. Ми прийшли до висновку, що при проходженні пружних хвиль в насиченому пористому середовищі виникає змінний звуковий тиск, внаслідок якого в породі утворюються зони стиску та розтягу. Вказані процеси створюють передумови для проявлення так званого явища «вібраційного насосу» [150]. Тому, з метою досліджень вищесказаного потрібно провести експерименти по впливу пружних коливань різних частот на процес руху рідини в порах для ряду робочих рідин.

Методика.

Дослідження проводились на спеціально створеному експериментальному устаткуванні, зображеному на рисунку 3.19, із врахуванням ряду припущень. Пористий канал гірської породи спрощуємо до прямолінійного капіляра діаметром 4 мм, а градієнт гідродинамічних тисків змодельовано аналогічно пластовим умовам на віддалі від свердловини порядку 150 метрів (5 кПа/м). Для підтримання усталеного тиску та швидкості руху рідини в капілярі ємність 1 виконана у вигляді посудини Маріотта. В якості робочих рідин використовували воду з мінералізацією 200 г/кг та загущені водні розчини КМЦ з в'язкістю 2;4;6;8;10 мПа·с. В якості генератора пружних коливань 3 використовували генератор ударного типу, потужністю 600 Вт, з можливістю регулювання частоти удару від 22 Гц до 45 Гц.

Порядок проведення експериментів.

1. Посудину 1 при закритих кранах 2 заповнювали робочою рідиною. Після відкриття кранів 2 система заповнювалась робочою рідиною і вимірювався час наповнення ємності 4. Для підвищення точності вимірювань відбір повторювали 20 разів.



1 – посудина Маріотта; 2 – крани; 3 – генератор пружних коливань; 4 – мірна ємність

Рисунок 3.19 – Схема експериментального устаткування

2. Для дослідження залежності витрати рідини через капіляр від частоти та в'язкості робочої рідини була використана теорія планування експерименту.

3. Вимірюваний параметр Q залежав від двох чинників (частота f і динамічна в'язкість μ). Для спрощення розрахунків значення чинників перетворювали в умовні одиниці, тобто так, щоб вони відповідали числам: -1, +1. Враховуючи, що $f_{\min} = 22$ Гц, $f_{\max} = 45$ Гц, $\mu_{\min} = 1$ мПа·с, $\mu_{\max} = 10$ мПа·с, тоді $f_{\text{сер}} = 33,5$ Гц, $\mu_{\text{сер}} = 5,5$ мПа·с. Інтервали зміни значень чинників становили відповідно $h_1 = 11,5$ Гц; $h_2 = 4,5$ мПа·с.

4. Відповідно до рекомендацій [151] була складена матриця планування експерименту для двох чинників (таблиця 3.1), згідно якої проводили вимірювання часу витікання кожної робочої рідини з системи під впливом генератора пружних коливань різної частоти. Кожен паралельний дослід виконували 20 разів і результати фіксували в таблиці 3.2.

Таблиця 3.1 – Матриця планування експерименту

Номер досліджу	Значення факторів				
	Умовна одиниця			Фактична одиниця	
	X_0	X_1	X_2	f , Гц	μ , мПа·с
1	+1	+1	+1	45	10
2	+1	-1	+1	22	10
3	+1	+1	-1	45	1
4	+1	-1	-1	22	1

Таблиця 3.2 – Результати експерименту

Номер досліджу	Експериментальні значення Q																				$Q_{\text{сеп}} \cdot 10^{-6}$ $\text{м}^3/\text{с}$
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
1	0,64	0,67	0,63	0,64	0,64	0,69	0,68	0,67	0,67	0,69	0,63	0,68	0,67	0,63	0,65	0,68	0,67	0,63	0,64	0,68	0,65
2	0,42	0,42	0,43	0,40	0,42	0,40	0,42	0,42	0,42	0,42	0,41	0,41	0,41	0,42	0,40	0,41	0,43	0,42	0,40	0,41	0,41
3	2,14	1,86	2,10	1,99	1,96	2,05	1,90	1,92	1,84	2,09	1,99	2,20	2,18	1,89	1,96	2,01	2,06	1,88	1,83	1,97	2,0
4	1,50	1,52	1,51	1,50	1,53	1,50	1,53	1,51	1,51	1,52	1,51	1,54	1,53	1,54	1,50	1,49	1,49	1,54	1,52	1,50	1,52

5. Розраховували коефіцієнти рівняння регресії за рівняннями:

$$b_0 = 1/4 \cdot (0,65 + 0,41 + 2,0 + 1,52) = 1,145;$$

$$b_1 = 1/4 \cdot (0,65 - 0,41 + 2,0 - 1,52) = 0,18;$$

$$b_2 = 1/4 \cdot (0,65 + 0,41 - 2,0 - 1,52) = -0,615.$$

Та отримали рівняння регресії $Q(X_1, X_2) = 0,18 \cdot X_1 - 0,615 \cdot X_2 + 1,145$.

6. Проводили аналіз рівняння регресії. Рядкові дисперсії дорівнюють:

$S_1^2 = 5,7 \cdot 10^{-4}$; $S_2^2 = 3,1 \cdot 10^{-4}$; $S_3^2 = 2,5 \cdot 10^{-4}$; $S_4^2 = 3 \cdot 10^{-4}$. Розрахункове значення критерію Кохрена $G_p = 0,397$. Табличне значення критерію Кохрена при $f_1 = 19$, $f_2 = 4$, буде $G_p = 0,4275$, отже дисперсія однорідна, визначаємо помилку дослідів $S_0^2 = 3,6 \cdot 10^{-4}$, а середньоквадратичне відхилення $S_0 = 1,89 \cdot 10^{-2}$.

7. Виконували перевірку значимості коефіцієнтів рівняння регресії. Дисперсія коефіцієнтів регресії становить $S_b^2 = 4,46 \cdot 10^{-6}$, а $S_b = 2,11 \cdot 10^{-3}$, за двома способами отримували, що всі три коефіцієнти є значимими.

8. Виконуючи перевірку адекватності рівняння регресії отримали, що табличне значення критерію Фішера більше розрахункового ($3,98 > 1,52$), отже це свідчить про адекватність рівняння регресії.

9. Для детальнішого дослідження залежності витрати рідини через капіляр для кожної в'язкості від частоти, проводили вимірювання у всіх технологічно можливих точках, отримані результати зображені в таблиці 3.3 і на рисунку 3.20.

Таблиця 3.3 – Результати детального дослідження

Номер досл.	Частота пружних коливань, f , Гц	Середньоарифметичне експериментальне значення $Q_{\text{ср}} \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$					
		вода, $\mu=1\text{мПа}\cdot\text{с}$	кмц, $\mu=2\text{мПа}\cdot\text{с}$	кмц, $\mu=4\text{мПа}\cdot\text{с}$	кмц, $\mu=6\text{мПа}\cdot\text{с}$	кмц, $\mu=8\text{мПа}\cdot\text{с}$	кмц, $\mu=10\text{мПа}\cdot\text{с}$
1	без впливу	1,32	1,01	0,71	0,46	0,28	0,11
2	22	1,52	1,30	1,00	0,78	0,63	0,41
3	28	1,67	1,39	1,12	0,86	0,69	0,45
4	30	1,72	1,42	1,15	0,90	0,72	0,46
5	35	1,85	1,54	1,21	1,01	0,78	0,53
6	44	2,00	1,72	1,42	1,17	0,89	0,64
7	45	2,04	1,76	1,46	1,21	0,92	0,67

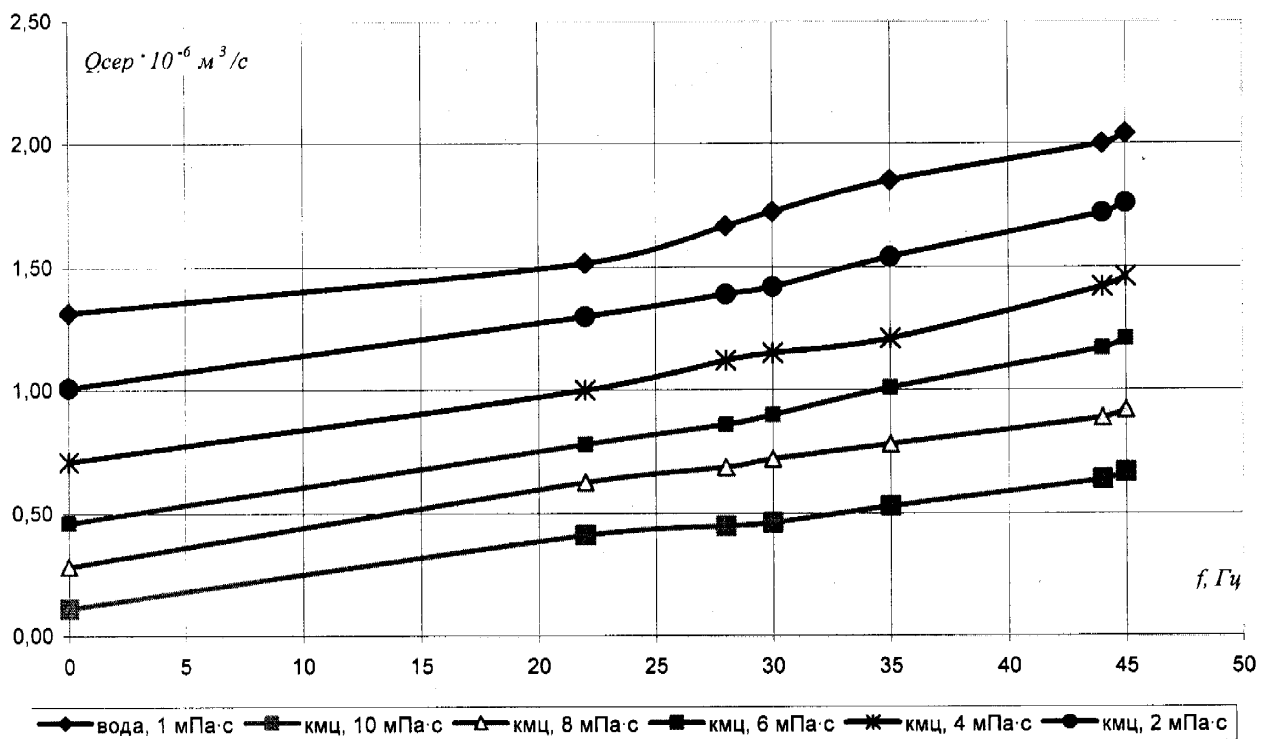


Рисунок 3.20 – Залежність витрати кожної рідини через капіляр від частоти пружних коливань

На основі експериментальних даних, з використанням програмного пакету MathCAD були отримані функції відгуку для всіх рідин з коефіцієнтами кореляції.

$$Q_{\mu=1} = 0,022 \cdot f + 1,056; r = 0,996; Q_{\mu=2} = 0,021 \cdot f + 0,832; r = 0,996;$$

$$Q_{\mu=4} = 0,019 \cdot f + 0,564; r = 0,994; Q_{\mu=6} = 0,019 \cdot f + 0,346; r = 0,996;$$

$$Q_{\mu=8} = 0,012 \cdot f + 0,347; r = 0,997; Q_{\mu=10} = 0,011 \cdot f + 0,141; r = 0,986.$$

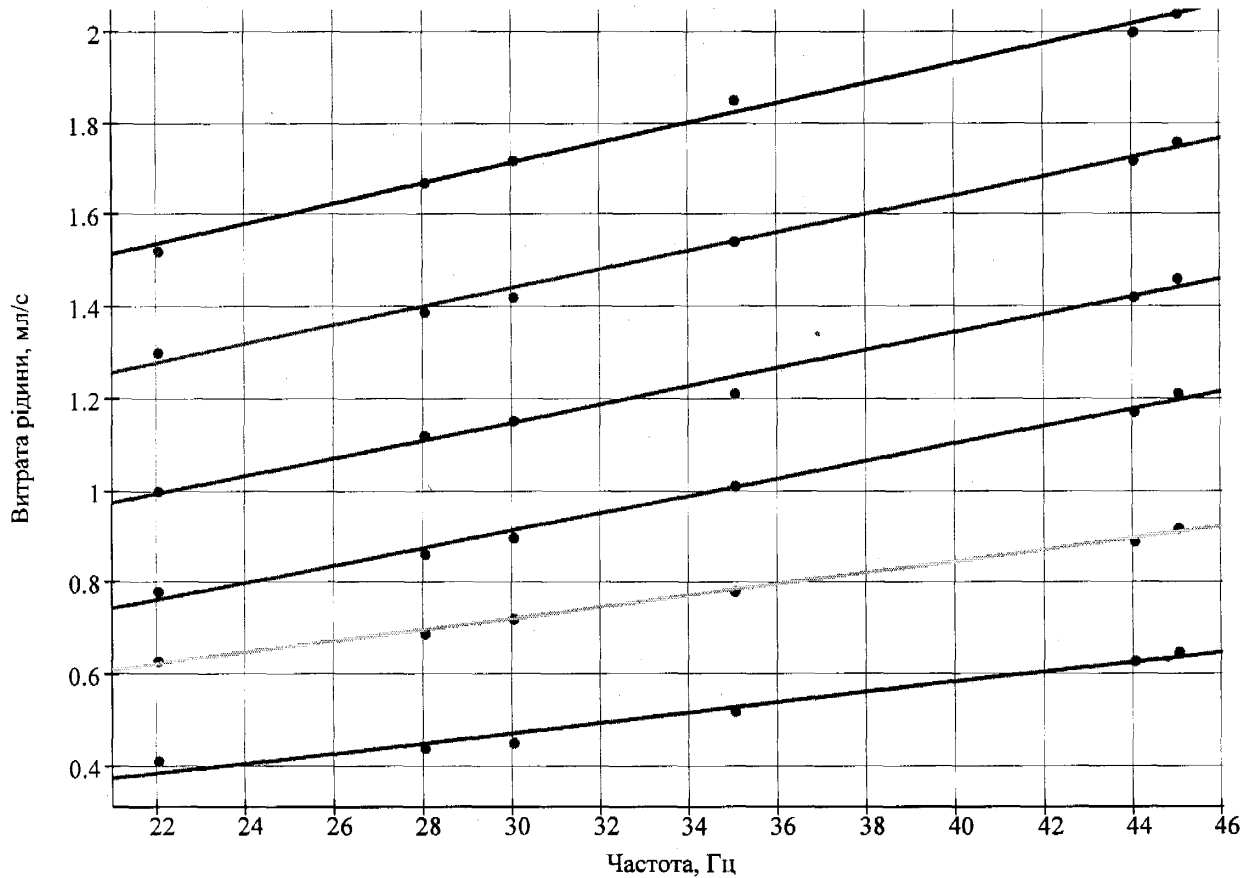


Рисунок 3.21 – Функції відгуку для всіх рідин в'язкістю 1–10 мПа·с та експериментальні точки

На основі аналізу проведених експериментів можна зробити такі висновки:

– підтверджено, що вплив пружних коливань на процес руху рідини в капілярі призводить до появи ефекту «вібраційного насосу», це дає підстави припускати аналогічні ефекти в пористому середовищі;

– встановлені залежності між витратою рідини через капіляр та частотою пружних коливань на стінки капіляра для робочих рідин з динамічною в'язкістю від 1 до 10 мПа·с.

Висновки до третього розділу

Розроблений геофон придатний для реєстрації параметрів пружних коливань та забезпечена його робота у рідинному середовищі. Експериментально

встановлено, що значення коефіцієнта поглинання пружних хвиль в менітових відкладах при поверхневих умовах рівне $0,047 \text{ м}^{-1}$.

Вплив пружними коливання інтенсивністю $0,01 \text{ Вт/см}^2$ під час експериментальних досліджень фільтрації нафтоводяної суміші в насипній моделі пласта призводить до збільшення фазової проникності по нафті. Експериментальними дослідженнями на моделі керна після повного обводнення продукції, встановлено, що дія пружними коливаннями інтенсивністю більше $0,01 \text{ Вт/см}^2$ призводить до додаткового вилучення залишкової нафти і її вміст становить 5-11%.

Експериментальними дослідженнями на моделі керна встановлено, що дія пружними коливаннями діапазону частот 50-500 Гц призводить до збільшення інтенсивності газовиділення і як наслідок збільшення тиску в середовищі на 3-6 кПа. На практиці для інтенсифікації процесів розгазування доцільніше використовувати діапазон частот 50-70 Гц, у зв'язку із незначним поглинанням пружних коливань даного діапазону частот у пористому середовищі пласта.

При випромінюванні в пористому насиченому середовищі пружних коливань комбінованих частот виникає низька різницева частота, а також кратні високочастотні складові. Експериментально підтверджено можливість комплексного випромінювання, як високочастотних, так і низькочастотних складових із використанням явища биття.

Підтверджено, що вплив пружних коливань на процес руху рідини в капілярі призводить до появи ефекту «вібраційного насосу», це дає підстави припускати аналогічні ефекти в пористому середовищі.

Встановлені залежності між витратою рідини через капіляр діаметром 4мм та частотою пружних коливань на стінки капіляра для рідин з динамічною в'язкістю від 1 до 10 мПа·с.

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЙ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ НАФТОГАЗОВИДОБУТКУ І
РЕЗУЛЬТАТИ ЇХ ВПРОВАДЖЕННЯ

4.1 Технологія впливу на пласт із використанням вибійних генераторів імпульсів пружних коливань

Зниження або втрата фільтраційної здатності колектора зумовлена різними чинниками, зокрема:

- зниженням проникності пластів у привибійній зоні внаслідок експлуатації свердловини;
- виникненням стійких водонафтових емульсій та колоїдно-дисперсних систем;
- перекриттям пор нерозчинними у воді і нафті осадами, які утворились в процесі буріння, поточному та капітальному ремонті свердловин.

На основі теоретичних і експериментальних досліджень удосконалена технологія різночастотного імпульсно-хвильового впливу на нафтогазонасичені породи передбачає використання таких ефектів:

- ефект додаткового градієнту тиску
- ефект руйнування колоїдно-дисперсних систем (КДС) та очищення від кольматанту привибійної зони пласта (ПЗП);
- ефект зміни капілярного тиску на межі поділу нафта-вода.

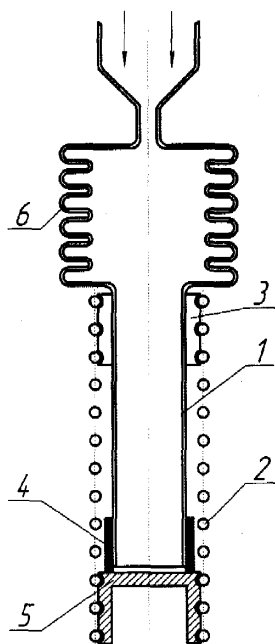
Технологічний процес складається з наступної послідовності етапів:

- підготовчий, що включає вибір свердловини, за параметрами останньої виконують необхідні розрахунки допустимих перепадів тиску, проводиться комплекс гідродинамічних досліджень інтервалів перфорації та підбір необхідного обладнання;

- технологічний, який полягає в проведенні імпульсно-хвильового впливу на пласт;

– заключний, який полягає у підніманні на поверхню компоновки ліфта та запуск свердловини в роботу після проведення досліджень із визначення ефективності проведених робіт.

В якості генератора пружних коливань використовується вибійний імпульсний генератор [152] (рисунок 4.1) або пристрій для створення періодичних імпульсів тиску [153] (рисунок 4.2), які працюючи в імпульсному режимі, випромінюючи як високочастотні так і низькочастотні гармоніки.



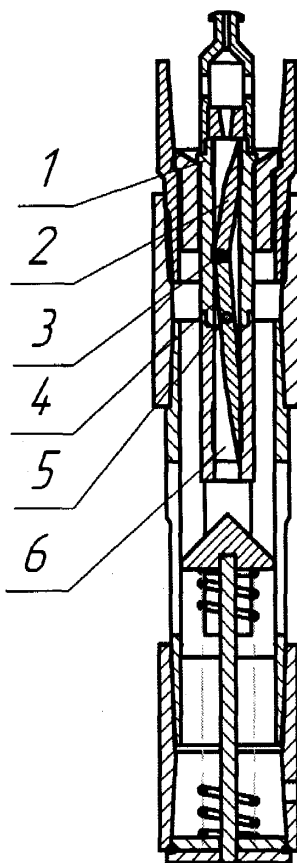
1 – корпус; 2 – пружина; 3 – втулка; 4 – постійний магніт; 5 – клапан з магнітом'якого матеріалу; 6 – об'ємно-пружинна камери

Рисунок 4.1 – Схема імпульсного генератора пружних коливань протічного типу

Реалізація розробленої технології різночастотного імпульсно-хвильового впливу відбувалась на свердловині 8 Ст. Самбір у період з 08.10.2010 р. по 11.10.2010.

Перед обробленням пласта виконували контрольне вимірювання дебіту нафти, який становив 3 м³/добу. Оброблення пласта проводили в інтервалі перфорації 3295-3333 м за допомогою генератора пружних коливань протічного типу зображеного на рисунку 73. Генератор опускався у свердловину на трубах НКТ Ø 73 до нижніх отворів перфорації і поступово піднімався до глибини 3295 м, при цьому створювалась кругова циркуляція нафти з допомогою

насосного агрегату ЦА-320 по схемі: насосний агрегат – труби НКТ – генератор пружних коливань – затрубний простір – замірна ємність – насосний агрегат.



1 – корпус, 2 – клапан, 3 – вісь рухома, 4 – шатун, 5 – вісь нерухома, 6 – канал

Рисунок 4.2 – Генератор протічного типу для створення періодичних імпульсів тиску

Контрольне вимірювання дебіту нафти проведене 16.10.2010 р. становило $6 \text{ м}^3/\text{добу}$.

Наступна реалізація описаної технології відбувалась на свердловинах Калуської НГРЕ. Станом на 20.08.2011р., в результаті освоєння після буріння свердловини 1 Семаківська компресуванням з пониженням рівня до глибини 453 м, отримано незначний приплив нафти об'ємом $0,1 \text{ м}^3$. Для покращення зв'язку з пластом та інтенсифікації припливу пластового флюїду в період з 20.08.2011 по 24.08.2011 на свердловині 1 Семаківська були проведені роботи по

інтенсифікації видобутку вуглеводнів із використанням технології різночастотного імпульсно-хвильового впливу на нафтогазонасичені породи.

Технологічна схема проведення операцій зображена на рисунку 4.3.

Для виконання даних робіт використовувалися:

- генератор пружних коливань ГКП-1;
- ежекторний насос УЕОС-2;
- пакер ПМКВ-118;
- інше допоміжне обладнання.

Роботи по впливу на пласт проводились 20.08. – 21.08.2011р. в такій послідовності.

1) Опустили у свердловину наступну компоновку: пристрій ГКП-1, НКТ Ø 73 до устя. Пристрій ГКП-1 опущено на глибину 921 м.

2) Під'єднали лінії для колової циркуляції бурового розчину: цементувальний агрегат, колона НКТ Ø 73, пристрій ГКП-1, затрубний простір, секціонована ємність, цементувальний агрегат. Свердловина не переливала, рівень рідини знаходився на глибині 5м від гирла свердловини.

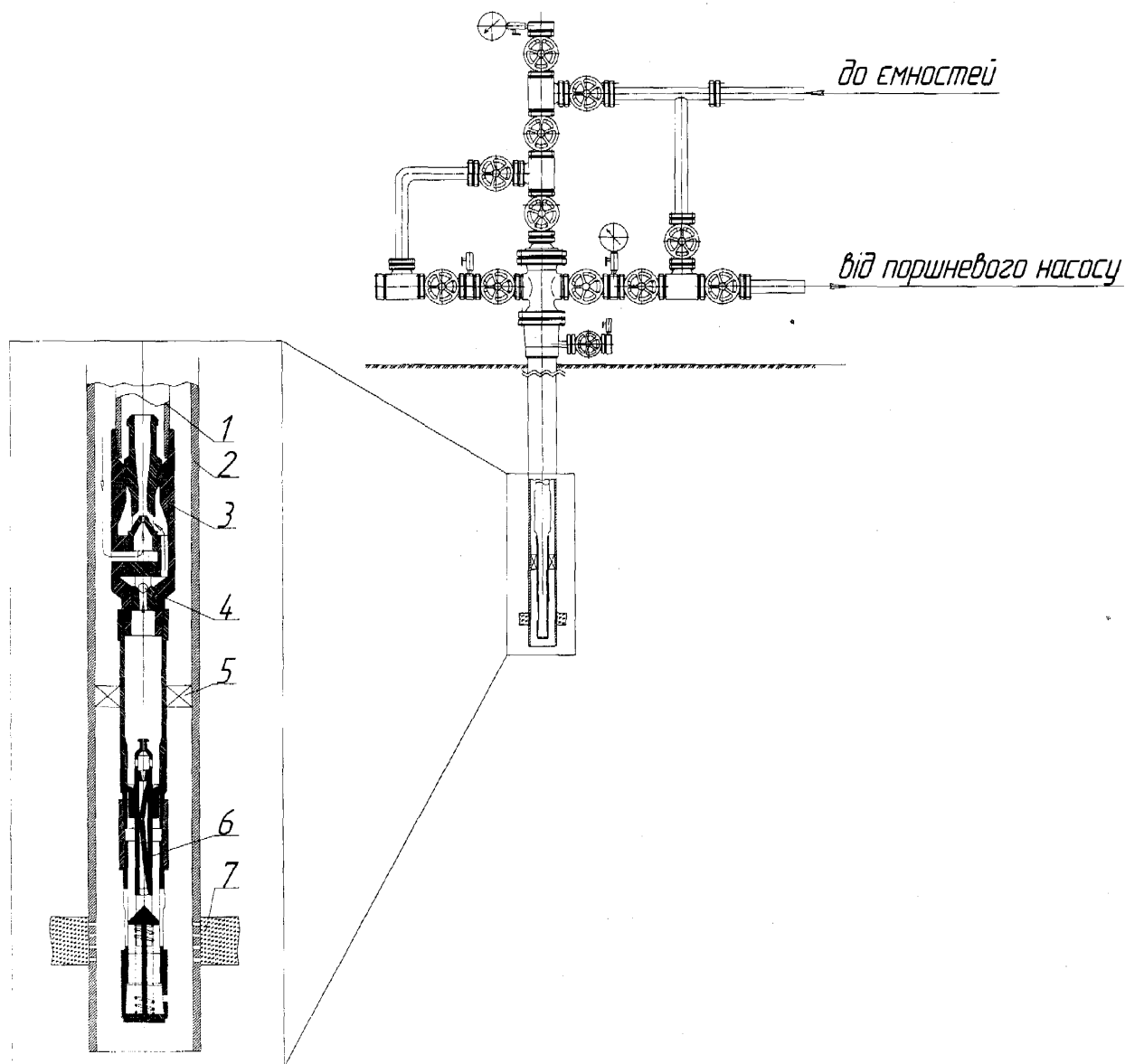
3) Пласт оброблено протягом 60 хв. при коловій циркуляції. Тиск на агрегаті підтримувався на рівні 3-4-6 МПа. Частота повторення імпульсів тиску становила 30-40-50 Гц при амплітуді імпульсів 2-5 МПа.

4) Проведено вказані роботи послідовно на глибинах 921м, 873 м, 848 м, 835 м, 799 м. Піднято ГКП-1 на поверхню.

Роботи по відпомповуванню пластового флюїду з допомогою пристрою УЕОС-2 і вихід на оптимальний режим припливу проводились 22.08.-23.08. 2011р. у наступній послідовності.

1) Опущено у свердловину наступну компоновку: НКТ Ø 73 - 20м, пакер ПМКВ – 118, НКТ Ø 73 - 6м, пристрій УЕОС-2, НКТ Ø 73 до устя.

2) Герметизували пакер шляхом розвантаження НКТ на глибині 787 м. Опущено в колону НКТ блокуючу вставку УЕОС-2. Опресовано пакер і колону НКТ тиском 10 МПа. Піднято блокуючу вставку на поверхню з допомогою кангового уловлювача і лебідки ЛС-6.



1 – НКТ, 2 – обсадна колона, 3 – струминний насос, 4 – зворотній клапан, 5 – пакер,
6 – гідроімпульсний пристрій, 7 – пласт

Рисунок 4.3 – Технологічна схема різночастотного імпульсно-хвильового впливу
на пласт

3) Опущено в колону НКТ депресійну вставку УЕОС-2 з глибинним манометром. Підготовчі роботи до проведення операцій по створенню регульованих депресій на пласт закінчено 23.08.2011 р.

4) Проведено періодичні зміни тиску під пакером шляхом зміни тиску на насосному агрегаті і прийнято рішення проводити наступний вплив на пласт при тиску на агрегаті 5-6 МПа.

5) Роботи проводились в постійному режимі з 7 год. 30 хв. до 11.00 год. із короткочасними зупинками для проведення контрольного заміру рідини в приймальних ємностях. Під час роботи спостерігались періодичні виходи газу із рідиною. Контроль за кількістю рідини у приймальних ємностях проводився постійно.

6) З 11 год. 30 хв. роботи проводились в режимі $P_{арр} = 5-6$ МПа протягом 10 хв. із зупинками насосного агрегату на 5 хв. Дія на пласт в такому режимі тривала до 13 год. 15 хв.

В результаті різночастотного імпульсно-хвильового впливу на пласт з допомогою генератора ГКП-1, а також наступного створення циклічних регульованих депресій на пласт з допомогою ежекторного насоса УЕОС-2, дозволили відновити зв'язок свердловини з продуктивними пластами, в результаті чого спостерігалось зростання тиску на усті свердловини 1 Семаківська і вихід рідини із періодичними пачками газу (рисунок 4.4).

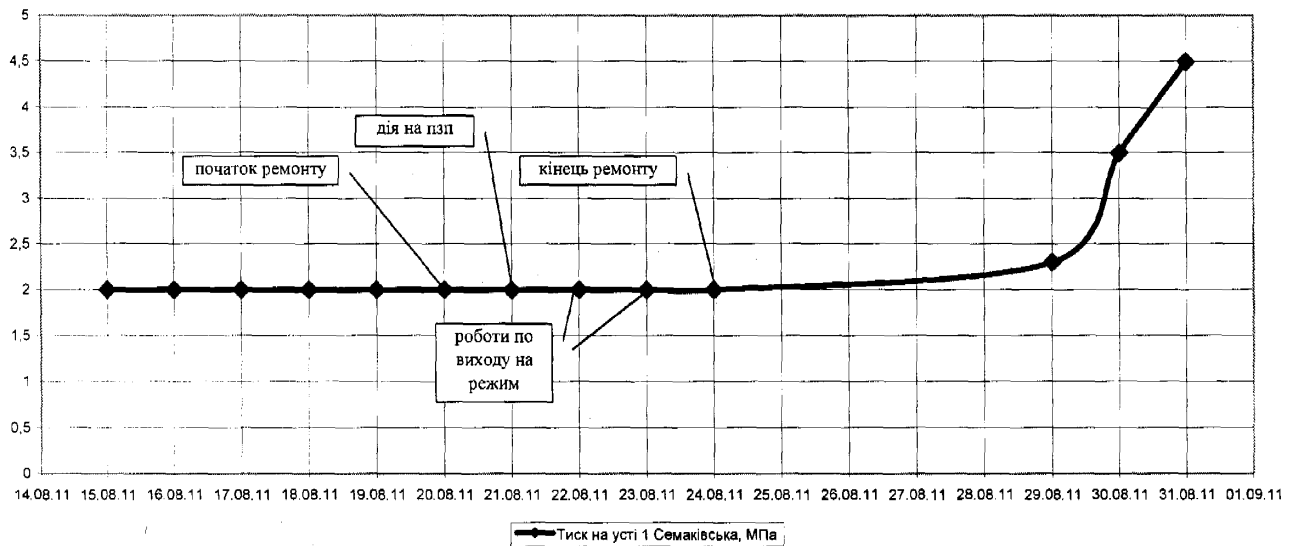
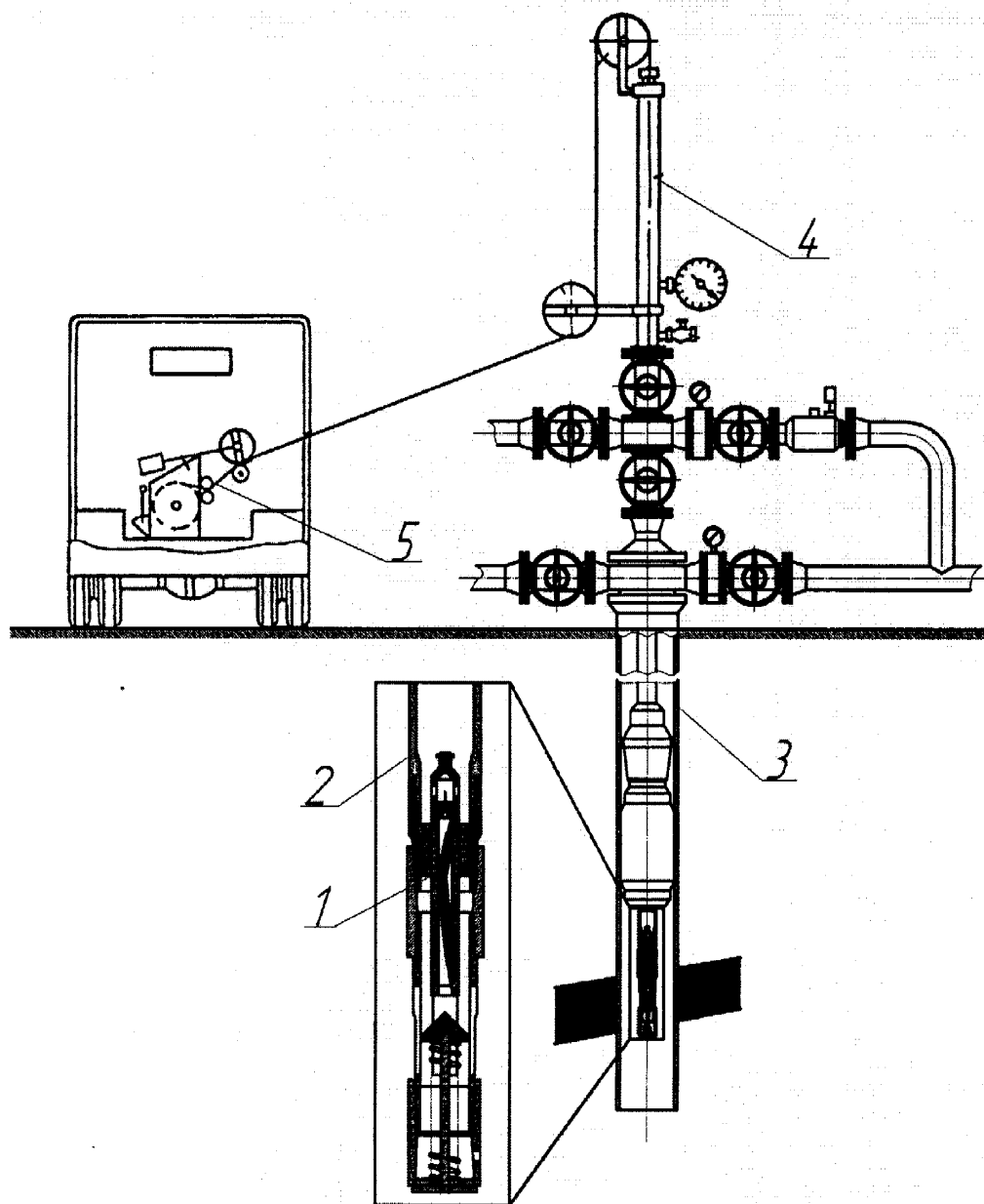


Рисунок 4.4 – Динаміка зміни тиску на усті свердловини 1 Семаківська

Описану технологію можна використовувати і в водонагнітальних свердловинах з незначними змінами, які полягають у відсутності використання струминного насоса з можливістю виконання спуску та підйому генератора пружних коливань через лубрикатор, а в якості робочого агента використовують

воду з БКНС. Технологічна схема використання технології на нагнітальній свердловині зображена на рисунку 4.5.



1 – генератор пружних коливань, 2 – колона НКТ, 3 – обсадна колона,
4 – лубрикатор, 5 – лебідка

Рисунок 4.5 – Схема проведення різночастотного імпульсно-хвильового впливу на нагнітальній свердловині із використанням вибійного генератора

Технологічний процес складається з наступної послідовності етапів:

– підготовчий, що включає вибір за попередніми дослідженнями однієї або декількох нагнітальних свердловини, за параметрами свердловин виконують

необхідні розрахунки допустимих перепадів тиску, проводиться комплекс гідродинамічних досліджень інтервалів перфорації та підбір необхідного обладнання;

- технологічний, який полягає в проведенні імпульсно-хвильового впливу на пласт;
- заключний, який полягає у підніманні на поверхню генератора пружних коливань через лубрикатор без зупинки свердловини і проведення досліджень із визначення ефективності проведених робіт.

4.2 Технологія впливу на пласт із використанням поверхневих пристроїв генерації імпульсів пружних коливань

В останні роки все більше зростає значення видобування нафти і газу на родовищах, які знаходяться на завершальній стадії розробки. У випадку розробки родовища при переважаючому гравітаційному режимі на глибинах до 1000 метрів, доцільним є використання поверхневих пристроїв генерації імпульсів пружних коливань.

На основі результатів експериментів описаних в розділі 3 можемо зробити висновок, що вплив пружними коливаннями в діапазоні частот 50-70 Гц на породи, насичені поверхневими пробами нафти, призводить до часткового додаткового розгазування нафти.

Вказаний ефект найдоцільніше використовувати на родовищах, які знаходяться на завершальній стадії розробки з переважаючим гравітаційним режимом [154].

Вплив пружними коливаннями на пласт призводить до появи фаз підвищення та пониження тиску відносно встановленого в пласті $P_{пл}$. У фазах пониженого тиску буде відбуватись вивільнення з нафти газової фази та наступна затримка (гістерезис) зворотного розчинення виділеної газової фази з одночасним її ізобаричним розширенням та просуванням під впливом постійно діючого

низхідного градієнта тиску в напрямку видобувних свердловин за принципом пластового ліфтування.

Вказана технологія різночастотного імпульсно-хвильового впливу на нафтогазонасичені породи передбачає використання таких ефектів:

- ефект додаткового градієнту тиску;
- ефект руйнування колоїдно-дисперсних систем (КДС) та очищення від кольматанту привибійної зони пласта (ПЗП);
- ефект зміни капілярного тиску на межі поділу нафта-вода;
- ефект розгазування нафти за умови тиску середовища близького до тиску насичення нафти газом;
- ефект додаткового розгазування нафти за умови тиску середовища меншого за тиск насичення нафти газом.

Вплив поверхневим генератором можна здійснювати, як через трубний так і через затрубний простір.

Технологічна схема проведення імпульсно-хвильового впливу в частотному діапазоні від 0,1 до 1 Гц із використанням дослідного гирлового обладнання ПГУ-3 зображена на рисунку 4.7. У випадку неможливості використання трубного простору, в якості робочого каналу передачі пружних коливань, пропонується використовувати установку ПГУ-3 через затрубний простір [155,156,157].

Монтаж установки ПГУ-3 здійснюється в наступній послідовності.

1) Демонтувати все обладнання, яке є на одній з бокових ліній фонтанної арматури.

2) Встановити на фундамент стіл 1. Електродвигун 2 закріпити в нижній частині стола 1 з допомогою підставки під двигун. Закріпити редуктор 4 з собачкою 23 на верхній частині стола над електродвигуном. Одягнути пас. Закріпити важіль 5 на столі. Закріпити на важелі пластини 7. Циліндр 19 з попередньо вкрученими клапанами 18 і 24 закріпити шпильками і гайками на столі. На циліндр 19 встановити пружину 16 і плунжер 15. Напряму 12 встановити на циліндрі і закріпити шпильками та гайками. В напряму 12

опустити бойок 13. На напрямній встановити та закріпити шків 11. Тросом 10, перекинувши його через шків, з'єднати пластини 7 та бойок 13.

3) Бокову лінію фонтанної арматури з'єднати з циліндром 19 з допомогою коліна 21. На останньому встановити манометр 20. На стійці 6 змонтувати ємність для доливання 8. З'єднати клапан 24 з ємністю 8 лінією для доливання 9. Заповнити свердловину, коліно, циліндр та ємність 8 установкою робочою рідиною.

Установка ПГУ-3 працює наступним чином. Електродвигун 2 через редуктор 4 приводить в дію собачку 23. Собачка 23 обертається. Контактуючи з важелем 5, собачка 23 його опускає (і одночасно піднімає бойок 13) на попередньо налаштовану висоту. При потраплянні собачки в спеціальний отвір у важелі бойок під власною вагою падає і вдаряє по плунжеру 15. Плунжер в свою чергу створює удар (імпульс тиску) в робочій рідині, якою заповнені циліндр 19, коліно 21 та свердловина. Пружина 16 повертає плунжер 15 та бойок 13 в положення до удару бойка. Через клапан доливання 24 відбувається поповнення робочої рідини. Ємність 8 може рухатися по стійці 6. Це дає можливість регулювати тиск доливу рідини в свердловину.

Робочі параметри установки ПГУ-3 можна регулювати наступним чином:

- на важелі 5 пересунути пластини 7 – зміна висоти підйому бойка;
- бойок 13 замінити легшим або важчим бойком – зміна імпульсного тиску;
- переміщувати ємність 8 по вертикалі – зміна тиску доливу рідини.

Демонтаж установки ПГУ-3 проводиться в порядку зворотному до монтажу.

Реалізація промислових досліджень та випробувань запатентованої розробки [155] проводились на свердловині 1 Кубаш, 3 Кубаш, 5 Кубаш (ділянка Кубаш-Луква Луквинського нафтового родовища, рисунок 4.6).

Перед дослідними випробуваннями проводили контрольні заміри дебіту на свердловині 3 Кубаш, який складав $7,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{добу}$, та контрольні заміри тиску на усті свердловини 5 Кубаш, який протягом останнього року становив 0,5 МПа.

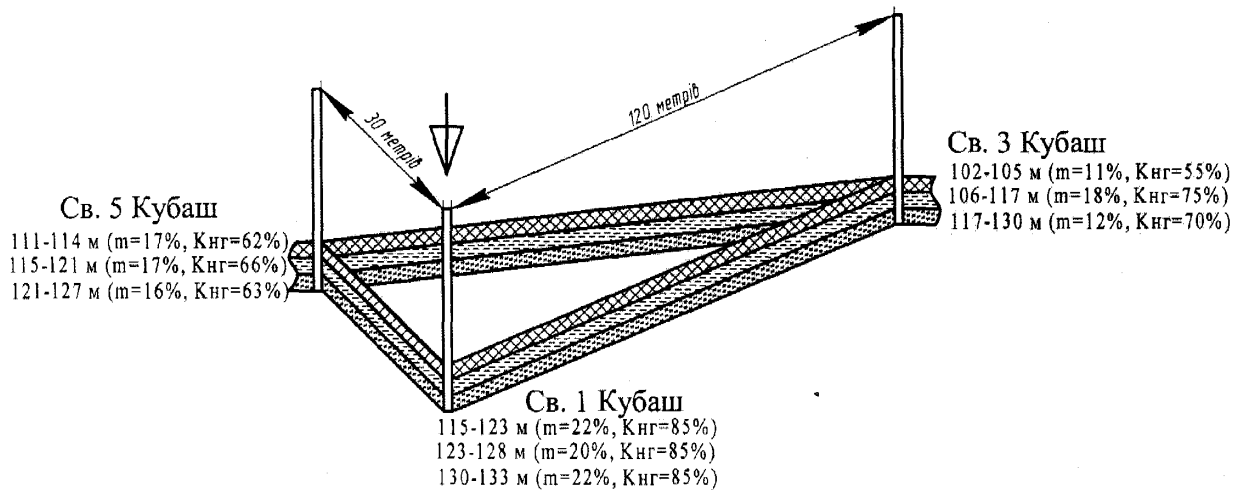
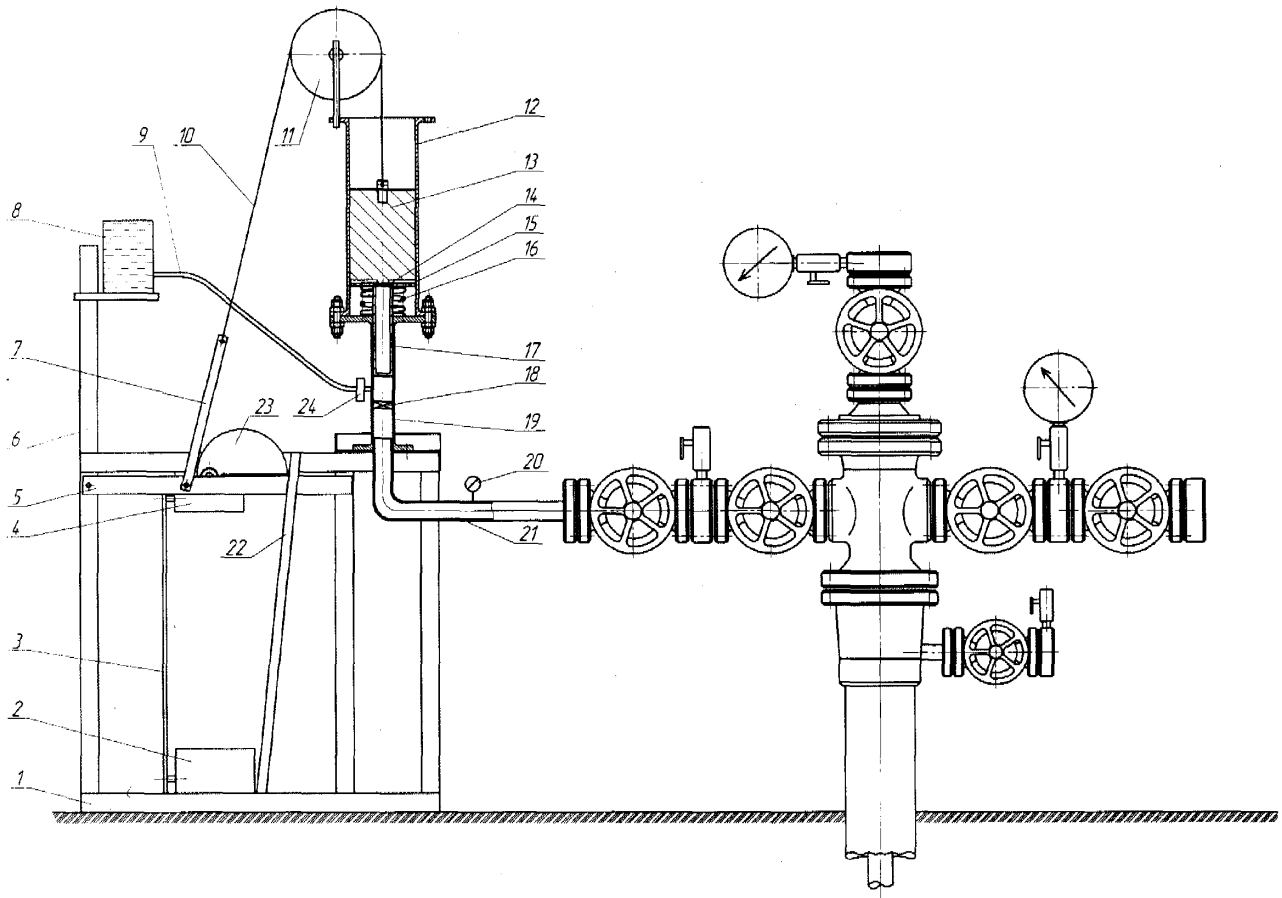


Рисунок 4.6— Блок-схема розміщення свердловин на ділянці Кубаш-Луква

Дослідно-промислові випробування проводились в наступній послідовності.



- 1 - стіл; 2 - електродвигун; 3 - пасова передача; 4 - редуктор; 5 - важіль; 6 - стійка; 7 - пластина;
 8 - ємність з робочою рідиною; 9 - лінія доливу; 10 - трос; 11 - шків; 12 - напрямна; 13 - бойок;
 14 - подушка мідна; 15 - плунжер; 16 - пружина; 17 - ущільнення плунжера; 18 - клапан
 центральний; 19 - циліндр; 20 - манометр; 21 - коліно; 22 - напрямні важеля; 23 - собачка;
 24 - клапан доливу

Рисунок 4.7— Схема дослідно-промислової установки ПГУ-3

Установка була змонтована на свердловині 1 Кубаш і генерувала періодичні гідравлічні імпульси тиску з частотою повторення 0,6 Гц (рисунок 4.8). Діапазон амплітуд імпульсів тиску – 10-15 МПа. Тривалість переднього фронту імпульсів – 1 мс. Імпульси тиску генеровані установкою створювали у пористому нафтонасиченому середовищі пласта поздовжні пружні коливання. Попередньо генератор імпульсів тиску установки регулювався таким чином, щоб при спектральному розкладі генерованої послідовності імпульсів тиску виділялись гармонічні складові з максимальною енергією коливань у діапазоні частот 10-100 Гц (рисунок 4.9).

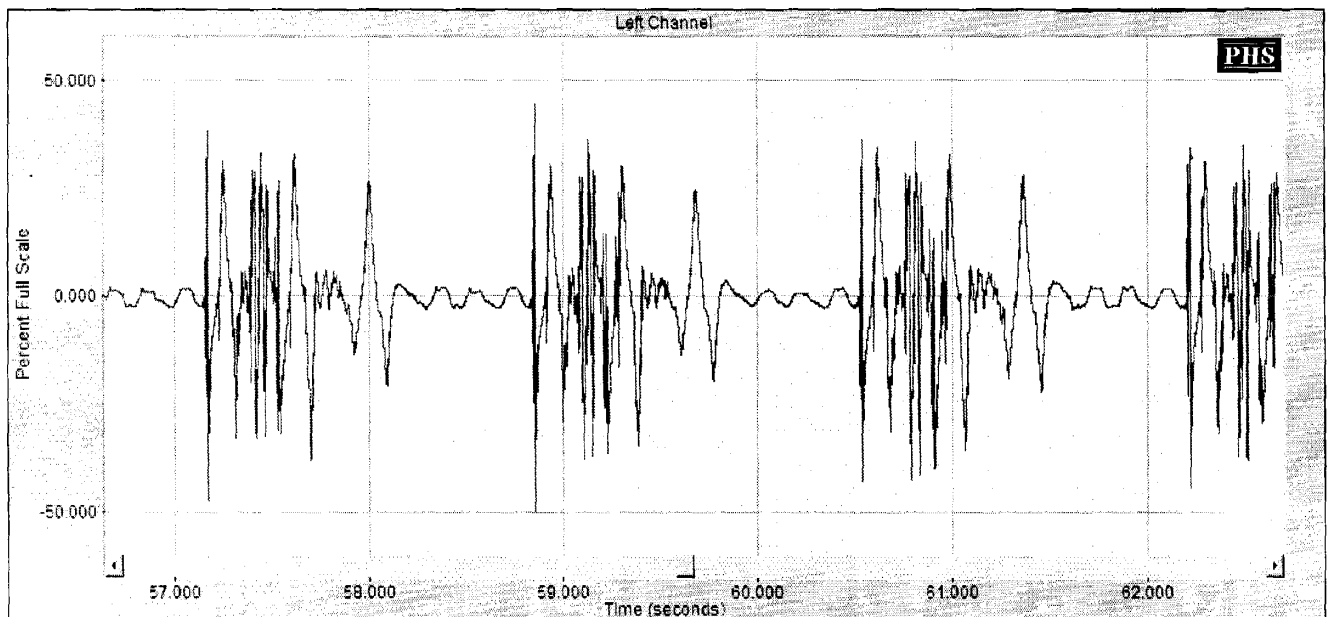


Рисунок 4.8 – Запис періодичних гідравлічних імпульсів тиску в програмі SpectraPLUS

На буфері свердловини 5 Кубаш, яка знаходилась на відстані 30 м від генеруючої свердловини 1 Кубаш, встановлювався прецизійний манометр для реєстрації змін тиску (рисунок 4.10). На свердловині 3 Кубаш, яка знаходилась на відстані 120 м від свердловини 1 Кубаш, фіксували дебіт нафти (рисунок 4.11).

Аналізуючи отримані результати можна зробити висновок, що пружні коливання створюють процеси додаткової дегазації нафти у пласті в промислових умовах, на що вказує зміна тиску на буфері свердловини №5.

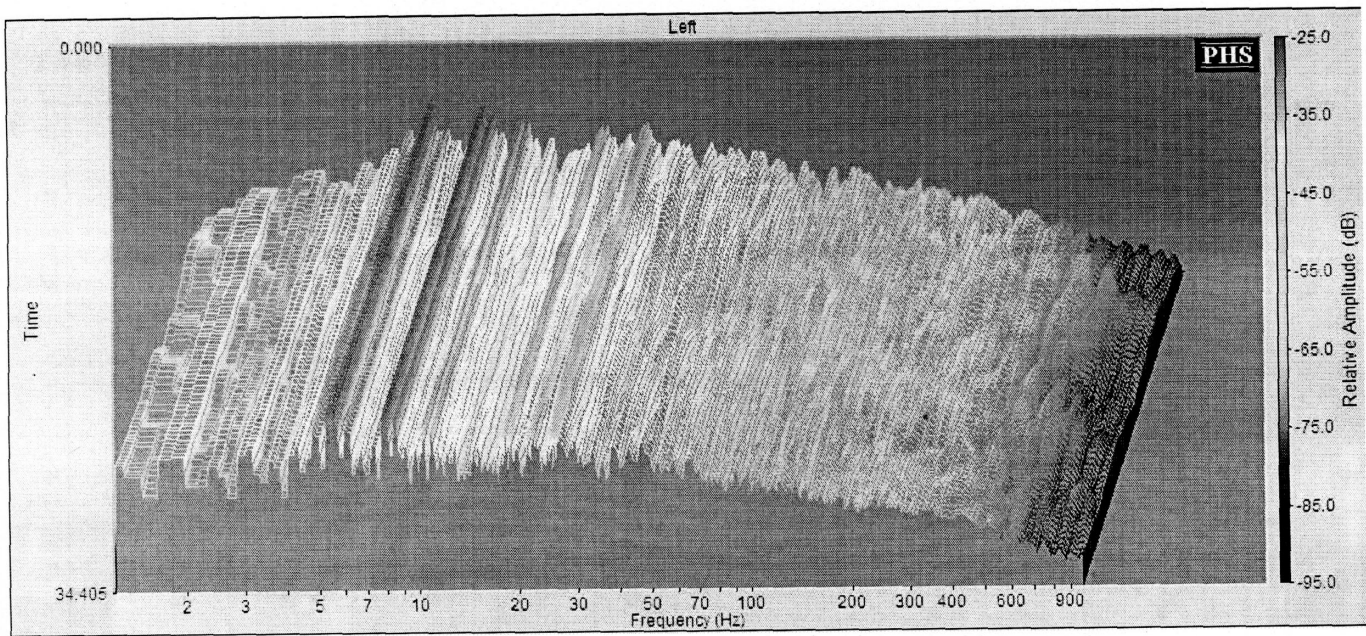


Рисунок 4.9 – Спектральний розклад генерованої послідовності імпульсів тиску

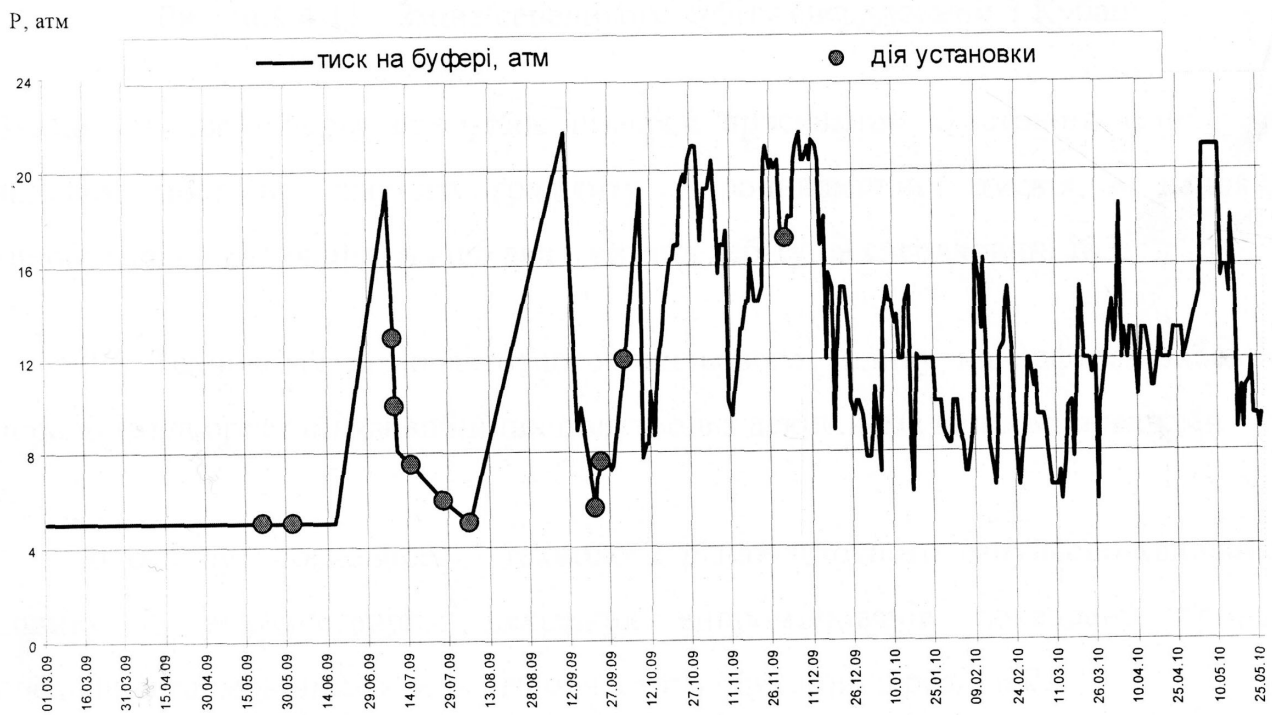


Рисунок 4.10 – Зміна тиску на буфері свердловини 5 Кубаш

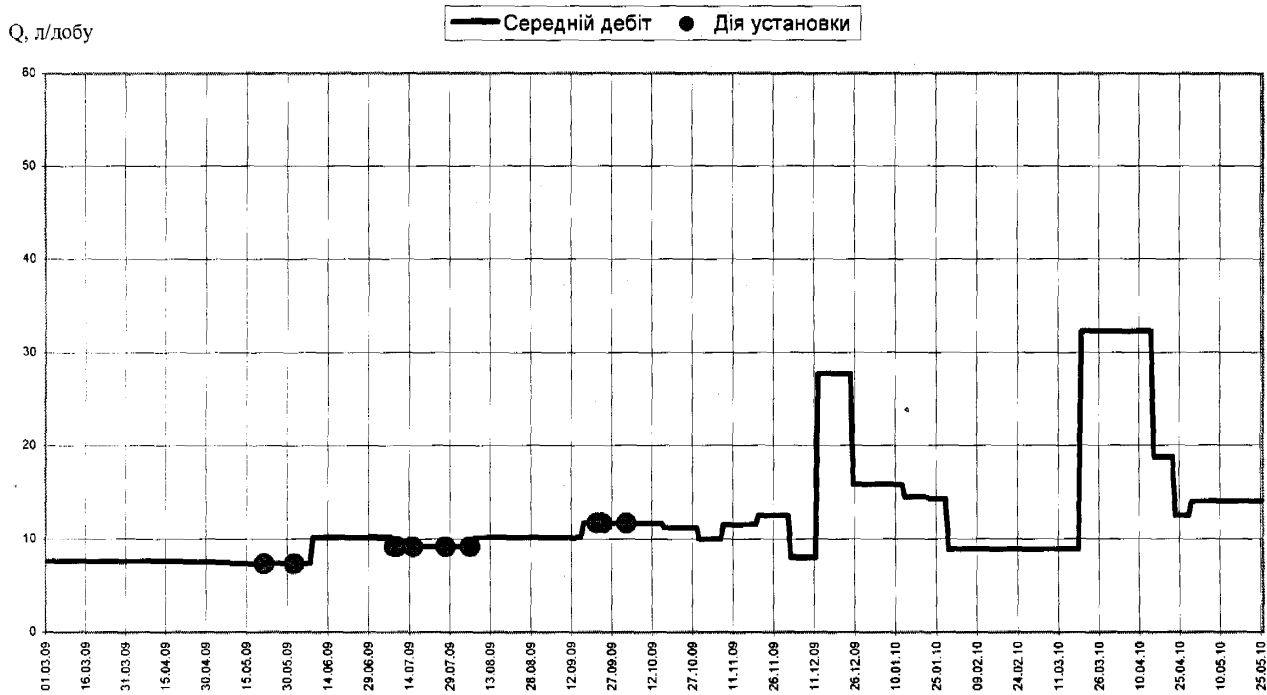


Рисунок 4.11 – Зміна середнього дебіту свердловини 3 Кубаш

Вказане, в свою чергу стимулює процеси просування пластового флюїду під впливом постійно діючого градієнту гідродинамічних тисків в напрямку видобувної свердловини, на що вказує зміна дебіту на свердловині №3.

4.3 Технологія різночастотного хвильового впливу на нафтогазонасичені породи із використанням вибійних пристроїв з декількома випромінювачами

В основу удосконаленої технології різночастотного імпульсно-хвильового впливу із використанням декількох випромінювачів покладено принцип поєднання гармонічних хвиль різної частоти описаний в розділі 2.

На рисунку 4.12 зображено: а) 1 – високочастотні коливання першого випромінювача з частотою f_1 ; б) 2 – високочастотні коливання другого випромінювача з частотою f_2 ; в) 3 – коливання биття відмінних частот, 4 – низькочастотне коливання, утворене внаслідок биття відмінних високих частот.

Високочастотні пружні коливання кожного з випромінювачів розповсюджуються в насиченій гірській породі у вигляді хвиль. Внаслідок суперпозиції високочастотних складових спостерігається явище биття відмінних

високих частот, які призводять до утворення низькочастотної пружної хвилі. За рахунок високого ступеня поглинання хвиль породою, високочастотні хвилі згасають на невеликій віддалі, а низькочастотна хвиля, з меншим ступенем поглинання, здатна впливати на віддалену ділянку пласта.

Характер розповсюдження пружних хвиль, з утворенням різночастотної хвилі биття показано на рисунку 4.13, де: а) 1 – високочастотна хвиля від першого випромінювача з частотою f_1 ; б) 2 – високочастотна хвиля від другого випромінювача з частотою f_2 ; в) низькочастотна хвиля 4 з частотою Δf , утворена внаслідок биття відмінних високих частот 3.

За рахунок дії на продуктивний пласт пружними коливаннями відбувається:

- зменшення міцності колоїдно-дисперсних систем нафти, кристалізованого парафіну, смол та іншого кольматуючого матеріалу, аж до його руйнування;
- очищення порових каналів колекторів;
- ліквідація блокуючого впливу залишкових фаз газу та води.

Сумісна дія на породи пласта пружними високочастотними і низькочастотними коливаннями значно інтенсифікує процес руйнування кольматуючого матеріалу та збільшує глибину оброблення зони пласта в 2-3 рази.

Технологічний процес складається з наступної послідовності:

1. Реалізацію технології проводять в процесі ремонту свердловини бригадою поточного або капітального ремонту.

2. Піднімають підземне експлуатаційне обладнання і визначають глибину штучного вибою.

3. При необхідності свердловину промивають.

4. Проводять аналіз геолого-технічних та геофізичних характеристик ближньої продуктивної зони свердловини і вибирають робочі частоти випромінювання генератора технологічного діапазону в межах від 1000 Гц до 60 кГц так, щоб друга відмінна висока частота коливань відрізнялась від першої на 3–5% для утворення явища биття.

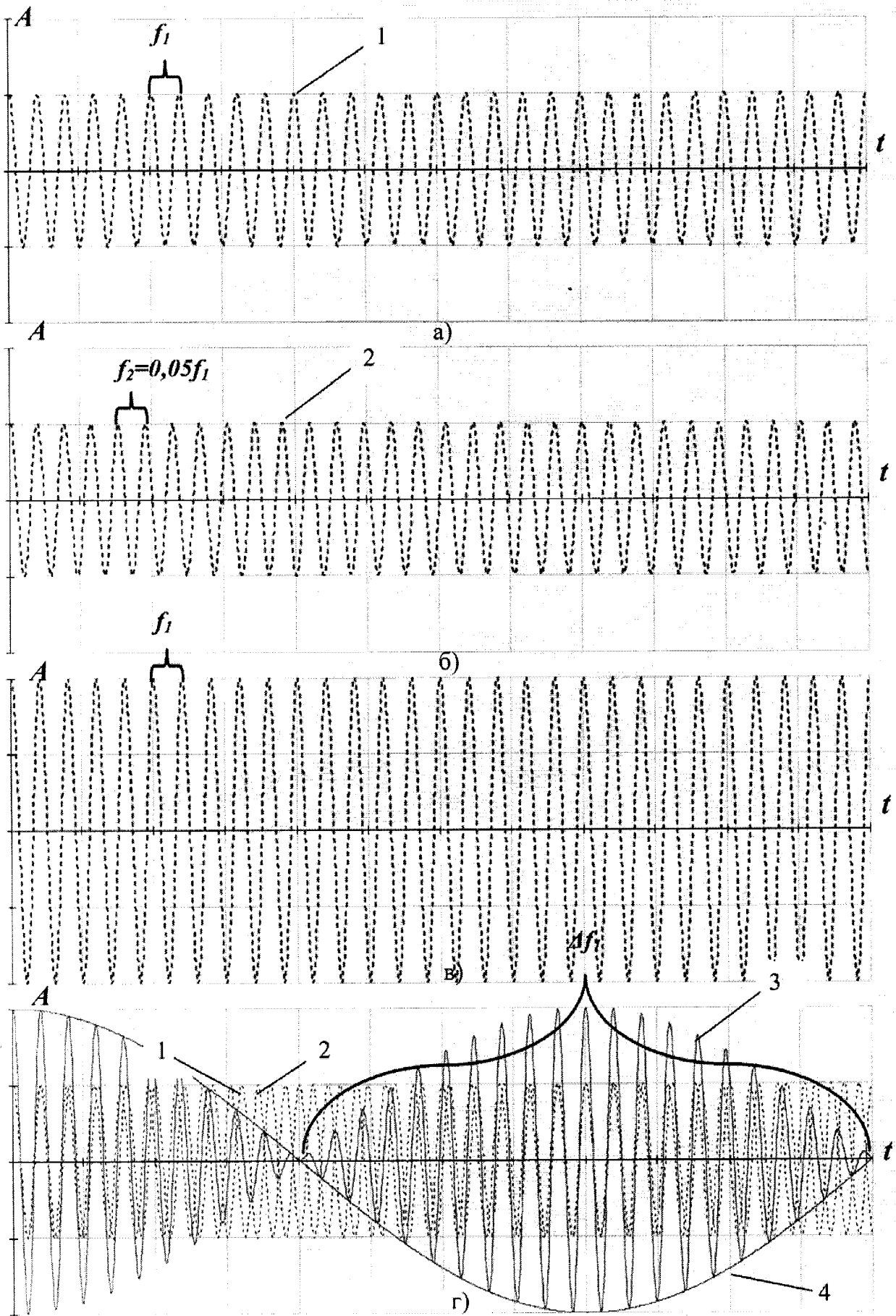


Рисунок 4.12 – Коливання створені випромінювачами

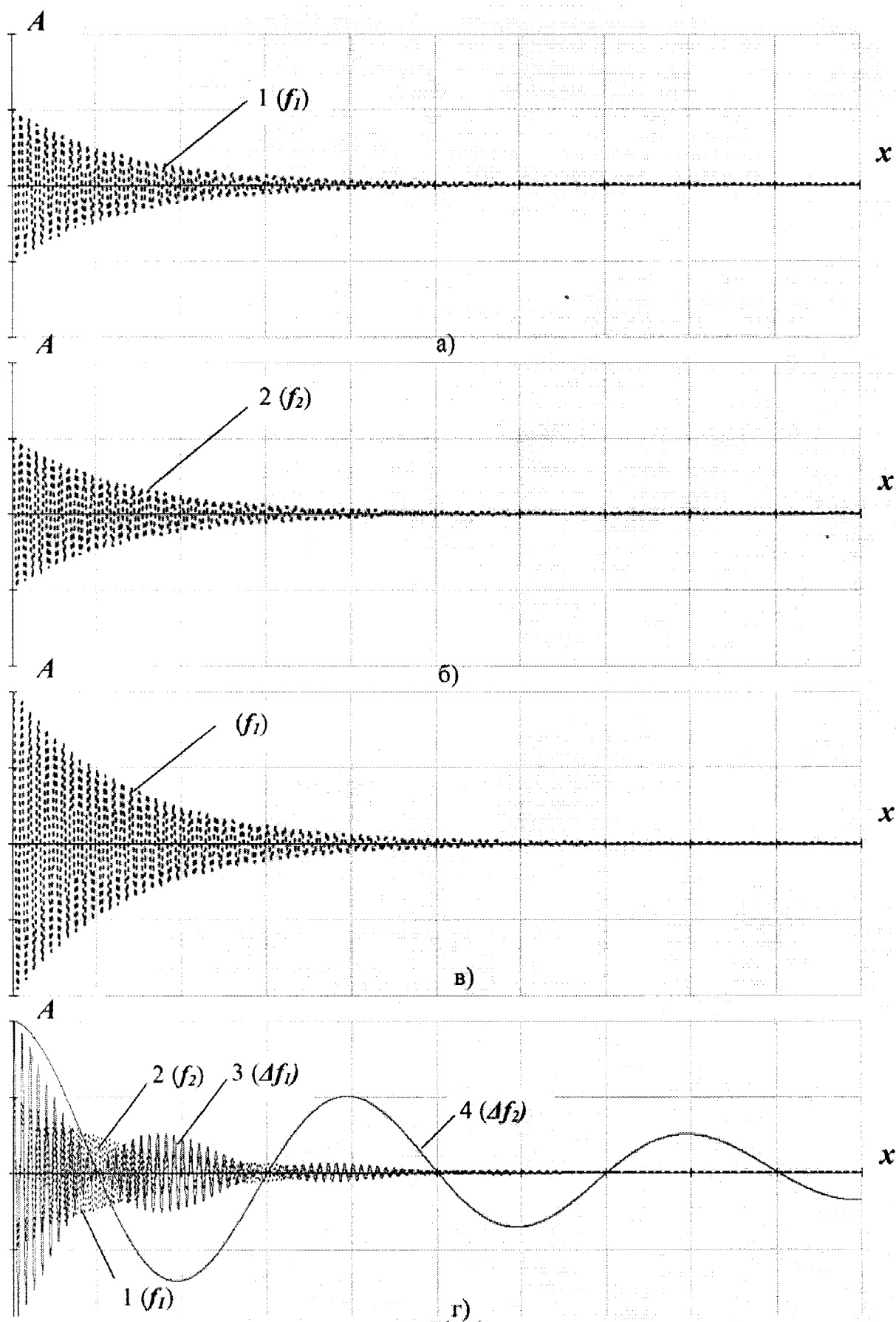
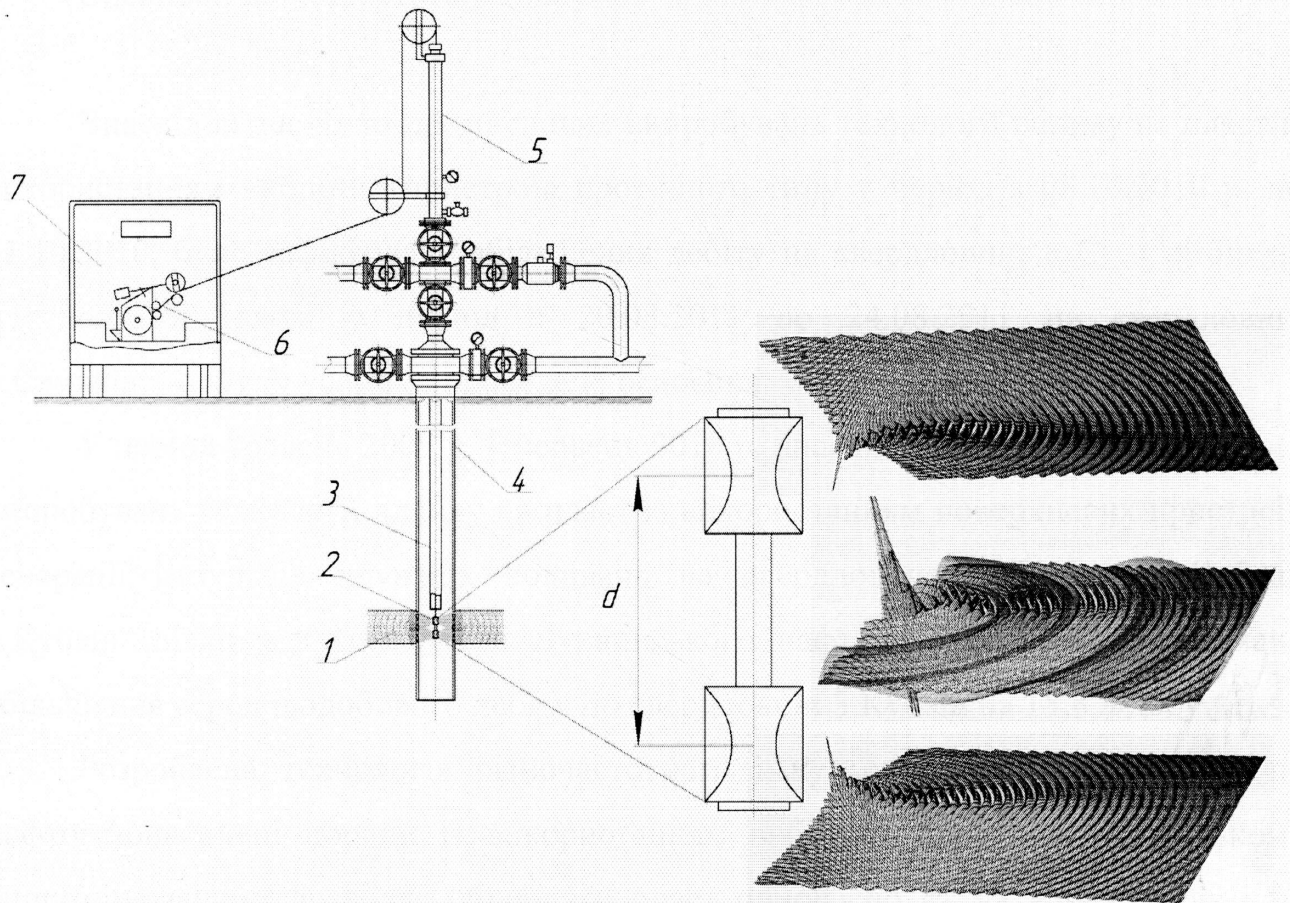


Рисунок 4.13 – Хвилі створені випромінювачами



1 – продуктивний пласт, 2 – генератор пружних коливань з декількома випромінювачами,
3 – колона НКТ, 4 – обсадна колона, 5 – лубрикатор, 6 – лебідка, 7 – станція керування

Рисунок 4.14 – Схема технології різночастотного імпульсно-хвильового впливу із використанням декількох випромінювачів

5. Спускають в свердловину пристрій для генерування коливань і встановлюють його навпроти продуктивного пласта, який підлягає обробленню.
6. Проводять оброблення пласта дією пружних коливань.
7. Піднімають пристрій на поверхню.
8. Опускають в свердловину підземне експлуатаційне обладнання.
9. Освоюють свердловину і пускають її в роботу.
10. При використанні пристрою, який опускають на кабелі, роботи по п.п. 1,2,3 і 8 не проводять.

Пропонована технологія може бути реалізована як на видобувних так і на нагнітальних свердловинах.

Висновки до четвертого розділу

Внаслідок дослідно-промислових випробувань технології впливу на пласт із використанням вибійних пристроїв протічного типу у період з 08.10.2010 р. по 11.10.2010. було зафіксовано збільшення дебіту на свердловині 8 Ст. Самбір на 3 м³/добу, а також у період з 20.08.2011 по 24.08.2011 на свердловині 1 Семаківська було успішно проведено освоєння.

У період травень 2009 р. – червень 2010 р. внаслідок дослідно-промислових випробувань технології впливу на пласт із використанням поверхневих пристроїв генерації імпульсів пружних коливань на свердловинах 1 Кубаш, 3 Кубаш, 5 Кубаш (ділянка Кубаш-Луква Луквинського нафтового родовища) отримане збільшення середньодобового дебіту по свердловині 3 Кубаш на 15,8 л/добу.

Розроблена технологія різночастотного імпульсно-хвильового впливу на нафтогазонасичені породи із використанням вибійних пристроїв з декількома випромінювачами дозволяє обробляти пласт одночасно як на високих так і на низьких частотах із використанням явища биття.

ВИСНОВКИ

Дисертація є закінченою науково-дослідною роботою, в якій на підставі результатів теоретичних і експериментальних досліджень процесів імпульсно-хвильового впливу на нафтогазонасичені породи удосконалено технології інтенсифікації видобутку вуглеводнів шляхом різночастотного імпульсно-хвильового впливу на пласт. Одержано наступні основні результати.

1. Отримано рівняння різночастотної суперпозиції циліндричних пружних хвиль в флюїдонасиченому середовищі та вперше встановлено раціональні параметри додаткового градієнту тиску в пласті, отриманого в результаті їх взаємодії та залежність глибини оброблення пласта від відстані між джерелами коливань за різних частот випромінювання. Вперше експериментально підтверджено утворення низькочастотної хвилі биття внаслідок взаємодії високочастотних хвиль діапазону 50 Гц – 20 кГц з різницею в частоті до 5% в умовах насипної насиченої моделі пласта.

2. Експериментально досліджено характер зміни меніску на межі нафтовода внаслідок дії пружних коливань та проведено теоретичну оцінку їх впливу на динамічну зміну капілярного тиску. Експериментальними дослідженнями встановлено, що вплив пружними коливання інтенсивністю $0,01 \text{ Вт/см}^2$ під час фільтрації нафтоводяної суміші в насипній моделі пласта призводить до збільшення фазової проникності для нафти в'язкістю 50 мПа·с на 25 %, а після повного обводнення продукції, дія такими коливаннями призводить до додаткового вилучення залишкової нафти на 5-11%.

3. Теоретичними дослідженнями встановлено, що під час розробки нафтових родовищ внаслідок впливу пружними коливаннями з діапазоном частот 50-500 Гц буде проявлятися ефект додаткового розгазування нафти, в тому числі і в умовах повного виділення з неї газу за даного пластового тиску. Експериментальними дослідженнями на моделі керна підтверджено, що хвильова дія цього ж діапазону частот призводить до збільшення інтенсивності

газовиділення в дегазованій за даного тиску нафті та збільшення тиску в модельному середовищі на 3-6 кПа.

4. Виконано теоретичні дослідження залежності початкової напруги зсуву колоїдно-дисперсних систем від проникності пласта з використанням експериментальних даних Горбачева Ю.И. та Кузнецова О.Л. та встановлено, що одночасна дія гідродинамічного градієнту тиску та градієнту тиску, який виникає внаслідок хвильового впливу, призводить до подолання граничної напруги зсуву колоїдно-дисперсних систем.

5. Встановлено, що вплив пружними коливаннями на процес руху рідини в капілярі призводить до збільшення швидкості руху, що дає підстави припускати аналогічні ефекти в пористому середовищі.

6. Розроблено технології з використанням оптимальних частот та амплітуд коливань, які забезпечать додаткове розгазування нафти та збільшення фазової проникності для нафти в умовах обводнення пласта. Також розроблено технології різночастотного імпульсно-хвильового впливу на нафтогазонасичені породи з використанням пристроїв з декількома випромінювачами, в тому числі різночастотними, які дозволять диференційовано обробляти ближню та віддалену зони пласта.

7. Технології впроваджено в свердловинах ТОВ “Капітал Ойл Україна”, Калуської НГРЕ та ТОВ “Західенергобуд”. Після застосування імпульсно-хвильових технологій в свердловині 8 Ст. Самбір ТОВ “Західенергобуд” дебіт нафти за контрольними замірами збільшився з 3 до 6 м³/добу, в свердловині 3 Кубаш Луквинського нафтового родовища ТОВ “Капітал Ойл Україна” – з 0,007 до 0,023 м³/добу, а свердловина 1-Семаківська Калуської НГРЕ була успішно освоєна.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Антоненко Н.М. Разработка и совершенствование техники и технологии импульсных методов воздействия на призабойную зону пласта [Текст] : дис. ...канд. техн. наук: 05.15.06 / Н.М. Антоненко – Волгоград, 1986. – 169 с.
2. Бойко В.С. Научные основы интенсификации нефтегазодобычи из неоднородных пластов с применением дисперсных систем [Текст] : дис. ... докт. техн. наук: 05.15.06. / В.С. Бойко – Ивано-Франковск, 1989. – 448 с.
3. Бойко В.С. Дослідження тривалості циклів гідродинамічних імпульсів під час депресійно-репресійного впливу на привибійну зону пласта [Текст] / В.С. Бойко, Я.Б. Тарко // НТЗ „Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ”. серії: Буріння нафтових і газових свердловин, Розробка та експлуатація нафтових і газових родовищ. – Івано-Франківськ: ІФТУНГ, 1997. – вип. 34. – С. 196-203.
4. Бойко В.С. Математична модель процесу кольтатації привибійної зони при первинному розкритті пласта [Текст] / В.С. Бойко, Я.Б. Тарко // Нафтова і газова промисловість. – 2001. – № 4. – С. 26-28.
5. Бойко В.С. Обводнення газових і нафтових свердловин [Текст] / В.С. Бойко, Р.В. Бойко, Л.М. Кеба, О.В. Семінський /: Монографія. – У 3-х томах, 4-х книгах. – Том 3 – Особливості експлуатації свердловин. Книга друга. – Івано-Франківськ: Вид-во “Нова Зоря”, 2011. – 701 с.
6. Гулый Г.А. Научные основы разрядноимпульсных технологий [Текст] / Г.А.Гулый. – Наукова думка, Киев:, 1990. – 208 с.
7. Єгер Д.О. Упорядковане використання методів дії на привибійну зону пластів у процесах нафтогазовидобутку [Текст] / Д.О.Єгер. – Техніка К.: – 2003. – 162 с.
8. Исследование причин снижения проницаемости продуктивных пластов, содержащих аномальные нефти при их вскрытии и эксплуатации [Текст] /Ф.С. Абдулин, В.И. Гусев, Я.Б. Тарко и др. // Тезисы докладов Всес. научно-

техн. конференції „Вскрытие продуктивных горизонтов и освоение нефтегазовых скважин” (Івано-Франковск, 1982). – УОП ИФИНГ, 1982. – с.65-66.

9. Інтенсифікація припливу вуглеводнів у свердловини [Текст] / Качмар Ю.Д., Світлицький В.М., Синюк Б.Б., Яремійчук Р.С. // В-во “Центр Європи”, – Львів. – 2004. – кн. 1. – 352 с.

10. Михалюк А.В. Торпедирование и импульсный гидроразрыв пластов / А.В. Михалюк – Наукова думка К.: 1986. – 207 с.

11. Ляхов Г.М. Основы динамики взрывных волн в грунтах и горных породах [Текст] / Г.М. Ляхов – Недра М.: – 1974. – 192 с.

12. Мислюк М.А. Моделювання явищ і процесів у нафтогазопромисловій справі [Текст] / М.А. Мислюк, Ю.О. Зарубін – Івано-Франківськ: Екор, 1999. – 491 с.

13. Нагорний В.П. Інтенсифікація видобутку природних вуглеводнів і спорудження підземних ємностей для їх зберігання з використанням енергії вибуху [Текст] : дис. ... докт. техн. наук: 05.15.06 / В.П. Нагорний – Київ, 1995. – 310 с.

14. Применение струйных аппаратов при освоении скважин [Текст] / Р.С.Яремійчук, Б.М. Кифор, В.Н. Лотовский, Л.П. Шанович // Обзорная информация. Серия: Техника и технология бурения. – М.: ВНИИОЭНГ, 1988. – 56 с.

15. Светлицкий В.М. Проблемы увеличения производительности скважин [Текст] / В.М. Светлицкий, П.Н. Демченко, Б.В. Зарицкий – Киев: Вид-во Паливода А.В., 2002. – 228 с.

16. Способ воздействия на призабойную зону скважин: А. с. 1462878 СССР, МКИ Е 21 В 43/25 / Я.Б. Тарко (СРСР), – 4255234/23; Заявл. 10.03.87; ДСП.

17. Тарко Я.Б. Аналіз гідродинамічних методів впливу на привибійну зону пласта [Текст] / Я.Б. Тарко // НТЗ „Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ”. – Івано-Франківськ: ІФТУНГ, 2001. – вип. 38. – с. 128-133.

18. Тарко Я.Б. До питання визначення розподілу тиску в пласті під час проведення депресійного впливу в свердловині [Текст] / Я.Б. Тарко // Нафтова і газова промисловість. – 2004, № 6. – С. 28-30.

19. Тарко Я.Б. Дослідження реологічних характеристик високов'язкої нафти Бугруватівського родовища [Текст] / Я.Б. Тарко // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – Івано-Франківськ: ІФНДТУНГ, 2004. – вип. 3(12). – с.81-86.

20. Тарко Я.Б. Розробка устаткування для проведення циклічної депресійно-репресійної дії на привибійну зону пласта [Текст] / Я.Б. Тарко // Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2004. – вип. 4(13). – с.15-19.

21. Тарко Я.Б. Технологія декольматації продуктивних пластів імпульсно-депресійною дією на привибійну зону свердловин [Текст] / Я.Б. Тарко // Вісник Сумського державного університету. Серія: Технічні науки. – Суми: СДУ, 2004. – № 13 (72). – С. 85-88.

22. Гиматудинов Ш.К. Справочная книга по добыче нефти [Текст] / Ш.К. Гиматудинов – М.: Недра, 1974. – 704 с.

23. Термогазохимическое воздействие на малодебитые и осложненные скважины [Текст] / Г.А. Чазов, В.И. Азаматов, С.В. Якимов, А.И. Савич. – М.: Недра, 1986. – 150 с.

24. Технологія підвищення дебіту свердловин із застосуванням імпульсної дії на привибійну зону пласта [Текст] / В.П. Нагорний, Ю.А. Писарев, В.І. Артьомов та ін. // Нафтова і газова промисловість. – 2001. – № 2. – С. 25-27.

25. Устройство для создания многократных депрессий на пласт: А.с. 1510437 СССР, МКИ Е 21 В 43/25 / Я.Б. Тарко, Г.А Лесовой, С.Г. Марьяк и др. (СССР). – № 4244280/23; Заявл. 12.05.87; Зарег. 22.05.89, ДСП.

26. Устройство для создания многократных депрессий на пласт: А.с. 1605621 СССР, МКИ У 21 В 43/25 / Я.Б. Тарко, Р.К. Рапий (СССР). – № 4636948/31; Заявл. 17.10.88; Зарег. 8.07.90, ДСП.

27. Хоминец З.Д. Результаты и перспективы применения компоновки ЭМПИ-УГИС при ремонте и освоении скважин [Текст] / З.Д. Хоминец, М.Ф. Печеркин, Н.А. Веремко // Нефтяное хозяйство. – М.: Недра, 2004. – №6. – с. 32-35.

28. Чекалюк Э.Б. Основы пьезометрии залежей нефти и газа [Текст] / Э.Б. Чекалюк. – Киев: Гос. из-во техн. лит. УССР, 1961. – 287 с.

29. Пат. 61587 Україна, МПК G01N 29/04, B21C 37/00, Спосіб акустичного контролю геометричних характеристик труб [Текст] / заявники Карпаш О.М., Векерик В.В., Криничний П.Я., патентовласник ТОВ НВФ "ЗОНД", ІФНТУНГ. – № 2003032058, заявл. 07.03.2003; опубл. 17.11.2003, Бюл. № 11.

30. Мойсишин В.М. Оцінка дії вибухової хвилі на прихоплену ділянку бурильної колони [Текст] / В.М. Мойсишин, В.Д. Яцишин, В.І. Векерик // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2010. – №1(34). – С. 39-45.

31. Пат. 15335 Україна, МПК H04R 7/00, H04R 9/00, Електродинамічний здвоєний низькочастотний гучномовець [Текст] / заявники Вашишак С.П., Чеховський С.А., Лютак З.П., Райтер П.М., патентовласник ІФНТУНГ. – №95020939, заявл. 28.02.1995; опубл. 30.06.1997, Бюл. № 3.

32. Мислюк М.А. До оцінювання динамічних процесів в бурильній колоні [Текст] / М.А. Мислюк, Ю.М. Василюк, І.Й. Рибчич // Нафтова і газова промисловість. – 2000. – №6. – С. 16-18.

33. Василюк Ю.М. Вплив динамічних процесів у бурилній колоні на роботу тришарошкових доліт [Текст] : дис. ... канд. техн. наук / Ю.М. Василюк. – Івано-Франківськ, 2007. – 145 с.

34. Пат. 28804 Україна, МПК B06B 1/20, Пристрій для створення акустичних коливань [Текст] / заявники Кондрат Р.М., Климишин Я.Д., Кондрат О.Р., патентовласник ІФНТУНГ. – № 97094761, заявл. 24.09.1997; опубл. 16.10.2000, Бюл. № 5.

35. Мислюк М.А. До вибору імпульсно-хвильової технології ліквідації прихватів ударними механізмами / М.А. Мислюк, І.Й. Рибчич, М.М. Яворський, М.П. Мельник // Нафтова і газова промисловість. – 2002. – №2. – С.23-25.

36. Пат. 58651 Україна, МПК E21B 43/25, Генератор гідравлічних імпульсів [Текст] / заявники Яворський В.М., Чернова М.Є., Чернов Б.О. та ін., патентовласник Чернов Б.О. – № 58651, заявл. 22.07.2010; опубл. 26.04.2011, Бюл. № 8.

37. Пат. 34403 Україна, МПК H04R 1/44, H04R 17/00, Випромінювач акустичний свердловинний [Текст] / заявники Синюк Б.Б., Світлицький В.М., Сенишин Я.І. та ін., патентовласник дочірня компанія "Укргазвидобування" НАК "Нафтогаз України" – № u200803098, заявл. 11.03.2008; опубл. 11.08.2008, Бюл. № 15.

38. Пат. 66622 Україна, МПК E21B 43/00, E21B 37/00, Імпульсне джерело пружних коливань [Текст] / заявники та патентовласники Горбунов В.І., Тарабарінов П.В., Зарубін Ю.О. – № 2003087454, заявл. 07.08.2003; опубл. 17.05.2004, Бюл. № 5.

39. Пат. 26318 Україна, МПК G01V 1/40, Спосіб збудження сейсмічних хвиль [Текст] / заявники Войтенко Ю.І., Гошовський С.В., Пасічник В.Д., патентовласник УкрДГРІ – № u200705780, заявл. 24.05.2007; опубл. 10.09.2007, Бюл. № 14.

40. Пат. 54532 Україна, МПК E21B 43/25, E21B 21/00, Свердловинний електролітичний генератор імпульсів [Текст] / заявники Тарабарінов П.В., Зарубін Ю.О., Дорошенко В.М. та ін., патентовласник ВАТ "Укрнафта", НТВК "Контракт" – № 2000020569, заявл. 01.02.2000; опубл. 17.03.2003, Бюл. № 3.

41. Пат. 65239 Україна, МПК E21B 28/00, Пристрій для розколювання привибійної зони гідрогеологічних свердловин [Текст] / заявники Давиденко О.М., Камишацький О.Ф., патентовласник НГУ – № 2003065823, заявл. 24.06.2003; опубл. 27.04.2009, Бюл. № 8.

42. Пат. 54521 Україна, МПК E21B 4/00, Гідравлічний генератор коливань [Текст] / заявники Троцький В.П., Зезекало І.Г., Троцька Є.В., патентовласник дочірня компанія "Укргазвидобування" УкрНДІгаз / – № 99127100, заявл. 27.12.1999; опубл. 17.03.2003, Бюл. № 3.

43. Пат. 38607 Україна, МПК E21B 43/26, Спосіб гідророзриву пласта [Текст] / заявники Качмар Ю.Д., Андрусак А.М., Бурмич Ф.М., та ін., патентовласник ВАТ "Укрнафта" – №2000074598, заявл. 31.07.2000; опубл. 15.02.2005, Бюл. № 2.

44. Школьников Р.Ш., Воздухоструйные генераторы акустических колебаний для коагуляции аэрозолей [Текст] / Р.Ш. Школьников // Акустический журнал. – 1963. – Т.9, №3. – С. 368 – 75.

45. Бергман Л. Ультразвук и его применение в науке и технике [Текст] / Л. Бергман. – Издательство иностранной литературы, г. Москва, 1956 г. – 726 с.

46. Неволин В.Г., Опыт применения звукового воздействия в практике нефтедобычи Пермского края [Электронный ресурс] / В.Г. Неволин // Электронный научный журнал "Нефтегазовое дело". – 2012. – №3. – С. 255-260.

47. Пат. 2001256 Российская Федерация, МПК E 21 B 43/25, Устройство для раздельной обработки двух пластов скважины [Текст] / заявитель: Уфимский нефтяной институт (2069457); патентообладатель: Антипин Ю.В., заявка: 4951849, 28.06.1991; опубл. 15.10.1993, Бюл. № 28.

48. Пат. 2047754 Российская Федерация, МПК E 21 B 43/25, Способ обработки призабойной зоны эксплуатационной скважины и устройство для его осуществления [Текст] / Ганиев Р.Ф.; заявитель и патентообладатель научно-производственная фирма "Волнотех". – № 5003605/03, заявл. 04.10.1991; опубл. 10.11.1995, Бюл. № 17.

49. Пат. 2186961 Российская Федерация, МПК E 21 B 43/25, Скважинный гидроакустический генератор [Текст] / заявители и патентообладатели: Муфазалов Р.Ш., Климов Т.В., Зарипов Р.К., и др. – № 2000105293/03, заявл. 06.03.2000; опубл. 10.08.2002, Бюл. № 05.

50. Кроуфорд А.Э. Ультразвуковая техника [Текст] / А.Э. Кроуфорд. – Издательство иностранной литературы, г. Москва, 1958 г. – 354 с.

51. Пат. 173171 Российская Федерация, МПК E 21 B 43/25, Способ обработки продуктивного пласта скважины [Текст] / заявитель и патентообладатель Гадиев С.М. – № 778260/22, заявл. 14.05.62; опубл. 15.05.1987, Бюл. № 18.

52. Гиматудинов Ш.К. Справочная книга по добыче нефти [Текст] / Ш.К. Гиматудинов. – М.: Недра, 1970. – 704 с.

53. Повышение продуктивности и реанимация скважин с применением виброволнового воздействия [Текст] / В.П. Дыбленко, Р.Н. Камалов, Р.Я. Шариффулин, И.А. Туфанов. – М.: Недра, 2000. – 380 с.

54. Гадиев С.М. Использование вибрации в добыче нефти [Текст] / С.М. Гадиев. – М.: Недра, 1977. – 160 с.

55. Пат. 479498 Украина, МПК Е 21 В 43/25, Вихревой акустический излучатель [Текст] / заявитель ИФИНГ; патентообладатели: Цок О.Е., Климишин Я.Д. – № 1884638/18, заявл. 20.02.1973; опубл. 05.08.75, Бюл. № 29.

56. Попов А.А. Импульсия в процессе нефтедобычи [Текст] / А.А.Попов. – М.: Недра, 1996. – 190 с.

57. Кичигин А.Ф. Канонические ансамбли в процессах интенсификации добычи нефти [Текст] / А. Ф. Кичигин, Д.А. Егер. – К.: Техніка, 2002. – 184 с.

58. Тарко Я.Б. Технологія та устаткування УСМД для створення багаторазових циклів депресійно-репресійної дії на пласт [Текст] / Я.Б. Тарко // Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. – 2005. – Вип. 1 (14). – С. 25–29.

59. Пат. 13715 Україна, МПК Е 21 В 28/00, Пристрій для проведення гідроударів на привибійну зону пласта [Текст] / заявник ИФИНГ; патентовласник Яремійчук Р.С. – №4704318/03, заявл. 14.06.89; опубл. 29.02.92, Бюл. №8.

60. Вибросейсмическое воздействие на нефтяные пласты с земной поверхности [Текст] Симонов Б.Ф., Опарин В.Н., Канискин Н.А. и др., // Нефтяное хозяйство. – 2000. – №5. – С. 41-46.

61. Заикина О. Труба и ударные [Текст] / О. Заикина // Прямые инвестиции. – 2006. – №5. – С. 40-41.

62. Пат. 912918 Российская Федерация, МПК Е 21 В 43/26, Способ разрыва пласта порохowymi газами [Текст] / заявитель ПечорНИПИнефть; патентообладатель Беяев Б.М., Королев И.П., Поздняков В.Ф. – № 2966505/22, заявл. 22.07.80; опубл. 15.03.1982, Бюл. № 10.

63. Войтенко Ю.І. Підвищення ефективності вибухово-прострільних робіт при видобутку нафти і природного газу [Текст] / Ю.І. Войтенко // Нафтова і газова промисловість. – 1999. – № 6. – С. 34-35.

64. Пат. 55098 Україна, МПК E21B 43/263, E21B 43/11 , Спосіб вибухової обробки свердловин [Текст] / заявники Бачеріков О.В., Войтенко Ю.І., Зарубін Ю.О. та ін., патентовласник ВАТ "Укрнафта" – № 2002065333, заявл. 27.06.2002; опубл. 17.03.2003, Бюл. №3.

65. Зейгман Ю.В. Эксплуатация систем поддержания пластового давления при разработке нефтяных месторождений [Текст] : Учебное пособие. / Ю.В. Зейгман. – Уфа. : УГНТУ, 2007. – 232 с.

66. Щербина К.Г. Хіміко-технологічні основи високотемпературного впливу на привибійну зону свердловини гідрореагуючими складами [Текст] : дис. ... докт. техн. наук: 05.15.06 / К.Г. Щербина. – Київ, 1999. – 313 с.

67. Пат. 46425 Україна, МПК E 21 B 43 / 24, Спосіб термохімічної обробки продуктивного пласта і горючо-окиснювальна суміш для його здійснення / заявник та патентовласник Щербина К.Г. – № 2001074965, заявл. 14.07.01; опубл. 15.05.02, Бюл. №5.

68. Смірнов О.П. Обґрунтування параметрів електророзрядного способу декольматації свердловин [Текст] : автореф. дис. ... к.т.н.: спец. 05.15.09 "Геотехнічна і гірнична механіка" / О.П. Смірнов; НАН України. Ін-т геотехнічної механіки ім. М.С.Полякова. – Дніпропетровськ, 2011. – 20 с.

69. Гулый Г.А. Электрический разряд в жидкости и его применение [Текст] :Сб. научн. тр./ Г.А.Гулый. – К.: Наукова думка, 1977. – 176 с.

70. Малюшевский П.П. Основы разрядноимпульсной технологии [Текст] / П.П. Малюшевский. – К.: Наукова думка, 1983. – 270 с.

71. Кучернюк А.В. Комплексні технології ударно-хвильового впливу на продуктивні горизонти як інструмент підвищення ефективності експлуатації нафтових родовищ [Текст] / А.В. Кучернюк // Нафтова і газова промисловість. – 2003. – №5. – С. 23-27.

72. Бойко В.С. Разработка та експлуатація нафтових родовищ [Текст]: Підручник. / В.С. Бойко – К.: «Реал-Принт», 2004. – 695 с.

73. Пат. 2301329 Российская Федерация, МПК Е 21 В 43/25, Прибор акустический скважинный [Текст] / заявитель и патентообладатель ЗАО "ИНЕФ"- № 2005136751/03, заявл. 28.11.05; опубл. 10.02.07, Бюл. № 03.

74. Пат. 2348794 Российская Федерация, МПК Е 21 В 43/25, Способ предотвращения образований асфальтосмолопарафиновых отложений и устройство для его реализации [Текст] / заявители и патентообладатели: Казаков В.А., Токарев В.С., Артемьев В.Н. – № 2007112201/03, заявл. 02.04.07; опубл. 10.10.08, Бюл. № 03.

75. Тарко Я.Б. Використання пружних коливань для інтенсифікації видобутку вуглеводнів [Текст] / Я.Б. Тарко, О.І. Гутак // Анотації міжнародної науково-технічної конференції " Інноваційні технології буріння свердловин, видобування нафти і газу та підготовки фахівців нафтогазової галузі". – м. Івано-Франківськ, 3-6 жовтня 2012. – С. 268-269.

76. Интенсификация добычи нефти низкочастотным акустическим воздействием [Текст] / Б.Н. Боголюбов, В.Н. Лобанов, Л.С. Бриллиант и др. // Нефтяное хозяйство. – 2000. – № 9. – С. 80 – 81.

77. Потапов Г.А. Оценка эффективности воздействия мощного низкочастотного акустического излучения на призабойную зону [Текст] / Г.А. Потапов, В.М. Правдухин // Нефтяное хозяйство. – 2000. – №9. – С. 82-85.

78. Применение волновых технологий в добыче нефти [Текст] / Л.С. Бриллиант, О.И. Рубинштейн, В.Ю. Морозов и др. // Нефтяное хозяйство. – 2000. – № 9. –С. 87-88.

79. Опытные-промышленные испытания мощного низкочастотного излучателя для интенсификации добычи нефти [Текст] / Л.С. Бриллиант, Б.Н. Боголюбов, И.В. Цыкин и др. // Нефтяное хозяйство. – 2000. – №9. –С. 89.

80. Комбинированное воздействие на продуктивные коллекторы месторождения Белый Тигр [Текст] / А.А. Меркулов, С.С. Назин, Р.А. Слиозберг и др. // Нефтяное хозяйство. – 2000. – №10. – С. 89-91.

81. Сорокин В.Н. О возможности виброобработки нефтяных залежей на нескольких доминантных частотах [Текст] / В.Н. Сорокин // Нефтяное хозяйство. – 2004. – №11. – С. 88-89.

82. Музипов Х.Н. Новая технология повышения производительности добывающих скважин с помощью ультразвука [Текст] / Х.Н. Музипов, Ю.А. Савиных // Нефтяное хозяйство. – 2004. – №12. – С. 53-54.

83. Сизоненко О.Н. Особенности изменения фильтрационных характеристик пород-коллекторов при реагентно-импульсном воздействии [Текст] / О.Н.Сизоненко, Н.М.Шерстнев // Нефтяное хозяйство. – 2001. – №4. – С. 49-51.

84. Повышение нефтеотдачи пластов с трудноизвлекаемыми запасами с использованием физических методов в поле нестационарного заводнения [Текст] / В.П. Дыбленко, В.С. Евченко, С.Н. Солоницин и др. // Нефтяное хозяйство. – 2005. – №4. – С. 76-79.

85. Черемисин Н.А. Проектирование необходимого спектра частот и оптимальной интенсивности волновых воздействий на пласты [Текст] / Н.А. Черемисин, А.Н. Черемисин // Нефтяное хозяйство. – 2007. – №6. – С. 35-39.

86. Меркулов А.А. Импульсные технологии интенсификации и гидроразрыв пласта (часть I) [Текст] / А.А. Меркулов // Нефтяное хозяйство. – 2007. – №9. – С. 127-129.

87. Меркулов А.А. Импульсные технологии интенсификации и гидроразрыв пласта (часть II) [Текст] / А.А. Меркулов // Нефтяное хозяйство. – 2007. – №11. – С. 118-120.

88. Освоение скважин на месторождениях с трудноизвлекаемыми запасами с использованием комплекса волновых технологий [Текст] / В.П. Дыбленко, И.А. Туфанов, А.П. Очковский и др. // Нефтяное хозяйство. – 2008. – №11. – С. 112-116.

89. Долгов Д.В. О целесообразности и проблемах применения технологии импульсного электровоздействия на пласты через высокодебитные скважины [Текст] / Д.В. Долгов, А.Д. Рибоков // Нефтяное хозяйство. – 2008. – №2. – С. 82-84.

90. Черемисин Н.А. Резонансное поглощение акустических волн и его использование для мониторинга разработки пористых коллекторов [Текст] / Н.А. Черемисин, А.Н. Черемисин // Нефтяное хозяйство. – 2009. – №7. – С. 87-89.

91. Повышение эффективности разработки истощенных месторождений с использованием комплекса новых сейсмоакустических технологий [Текст] / О.Л. Кузнецов, В.П. Дыбленко, И.А. Чиркин и др. // Нефтяное хозяйство. – 2009. – №1. – С. 50-54.

92. Акустическое воздействие на призабойную зону пласта [Текст] / О.Л. Кузнецов, С.А. Ефимова, Ю.Ф. Жуйкою и др. // Нефтяное хозяйство. – 1987. – №5. – С. 30-33.

93. Исследование гидравлических золотниковых вибраторов для обработки скважин [Текст] / С.М. Гадиев, Н.А. Веклич, Р.М. Нургалеев и др. // Нефтяное хозяйство. – 1972. – №2. – С. 42-45.

94. Гадиев С.М. Применение вибрации при бурении и эксплуатации скважин [Текст] / С.М. Гадиев, А.В. Кичигин, В.И. Назаров // Нефтяное хозяйство. – 1980. – №7 – С. 25-27.

95. Янтурин А.Ш. Выбор частот при вибрационном воздействии на призабойную зону пласта [Текст] / А.Ш. Янтурин, Р.Ш. Рахимкулов, Н.Ф. Кагарманов // Нефтяное хозяйство. – 1986. – №12. – С. 40-42.

96. Совершенствование импульсного воздействия на пласт [Текст] / Н.Г. Зайнуллин, К.Г. Мазитов, А.С. Якимов и др. // Нефтяное хозяйство. – 1991. – №3. – С. 19-21.

97. Jean F.Allard Propagation of sound in porous media : modelling sound absorbing materials / Jean F.Allard – 2nd ed. Noureddine Atalla. – 1994. – p. 300.

98. Brekhovskikh L.M. Waves in Layered Media / L.M. Brekhovskikh // Academic Press, New York. – 1960.

99. Cagniard L. Reflection and Refraction of Progressive Waves / L. Cagniard // McGraw-Hill, New York. – 1962.

100. Ewing W.M. Elastic Waves in Layered Media / Ewing W.M., Jardetzky W.S. and Press F. // McGraw-Hill, New York. – 1957.

101. Beranek L. Acoustical properties of homogeneous isotropic rigid tiles and flexible blankets / Beranek L. // J. Acoust. Soc. Amer., – 1947. – №19. – p. 556–568.

102. Biot M.A. The theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. I. Low frequency range. II. Higher frequency range / Biot M.A. // J. Acoust. Soc. Amer. – 1956. – №28. – p.168–191.

103. Biot M.A. The elastic coefficients of the theory of consolidation / Biot M.A. Willis D.G.// J. Appl. Mechanics. – 1957. – №24. – p.594–601.

104. Biot M.A. Generalized theory of acoustic propagation in porous dissipative media / Biot M.A.// J. Acoust. Soc. Amer.. – 1962. – №34. – p.1254–1264.

105. Шерифф Р. Сейсморазведка [Текст] / Р. Шерифф, Л. Гелдарт. – М.: Мир, 1987. – Т.1 – 448 с.

106. Яворский Б.М. Основы физики [Текст] / Б.М. Яворский, А.А. Пинский. – М.: Физматлит, 2003. – Т.2 – 552 с.

107. Соловьянова И.П. Теория волновых процессов: Акустические волны [Текст] : Учебное пособие / И.П. Соловьянова, С.Н. Шабунин. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2004.– 142 с.

108. Михайлов И.Г. Поглощение ультразвуковых волн в гидкостях [Текст] / И.Г. Михайлов, С.Б. Гуревия // Успехи физических наук. – 1948. – Т. XXXV, – №1. – С. 35-42.

109. Сургучев М.Л. Гидродинамическое, акустическое, тепловое циклическое воздействие на нефтяные пласты [Текст] / М.Л. Сургучев, О.Л. Кузнецов, Э.М. Симкин. – М.: Недра, 1975. – 180 с.

110. White J. E. Seismic Waves — Radiation, Transmission and Attenuation / White J. E. –New York, McGraw-Hill, 1965.

111. White J. E. Static friction as a source of seismic attenuation: Geophysics / White J. E. – New York, McGraw-Hill. – 1966.

112. Боганик Г.Н. Сейсморазведка [Текст]: Учебник для вузов / Г.Н. Боганик, И.И. Гурвич. – Тверь: Издательство АИС, 2006. – 744 с.

113. Запорожец В.М. Геофизические методы исследования скважин. Справочник геофизика [Текст] / В.М. Запорожец. – М.: Недра, 1983. – 591 с.

114. Biot M.A. Theory of Propagation of Elastic Waves in a Fluid-Saturated Porous Solid. I. Low-Frequency / Biot M.A. // THE JOURNAL OF THE ACOUSTICAL SOCIETY OF AMERICA. – Vol. 28. – 1965. – N2. – pp. 168-178.

115. Тимошенко В.И. Нелинейная акустика – ветвь инновационных технологий. Публичная лекция [Электронный ресурс] / В.И. Тимошенко. – Технологический институт Южного федерального университета в г. Таганроге, 2009. – 23 с.

116. Інноваційні технології буріння свердловин, видобування нафти і газу та підготовки фахівців нафтогазової галузі – 2012 [Текст] : анотації міжнародної науково-технічної конференції, – м. Івано-Франківськ, 3-6 жовтня 2012 р. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2012. – 340 с.

117. Бойко В.С. Підземна гідрогазомеханіка [Текст]: навч. посіб. / В.С.Бойко, Р.В.Бойко. – Львів.: Априорі, 2005. – 452 с.

118. Валов Максим Технология струйной печати Epson Micro Piezo [Электронный ресурс] / Максим Валов. – 2009. URL: <http://technofresh.ru/technology/poligon/epson-micro-piezo.html>

119. Галямина И.П. Ультразвук. Маленькая энциклопедия [Текст] / И.П. Галямина. – М.: Советская энциклопедия, 1979. – 400 с.

120. Влияние ультразвуковых колебаний на процесс разгазирования нефти [Текст] / Г.С. Степанова, Т.Л. Ненартович, Г.Н. Ягодов, В.Н. Николаевский // Бурение и нефть. – 2003. – № 7–8. – С. 36–38.

121. Ультразвук определяет отбор нефти при вибросейсмическом воздействии на пласт [Текст] / В.Н. Николаевский, Г.С. Степанова, Т.Л. Ненартович, Г.Н. Ягодов // Нефтяное хозяйство. – 2006. – №1. – С. 48-50.

122. Влияние пластовых условий на эффективность вибросейсмического воздействия в нефтяных залежах [Текст] / Ю.В. Лукьянов, А.В. Шувалов, Р.З. Имамов и др. // Нефтяное хозяйство. – 2007. – №4. – С. 58-61.

123. Пирсон С.Дж. Учение о нефтяном пласте [Текст] / С.Дж. Пирсон. – М.: Гостоптехиздат, 1961. – 579 с.

124. Адамсон А. Физическая химия поверхностей [Текст] / А. Адамсон. – М.: Мир. 1979. – 568 с.

125. Гутак О.І. Підвищення нафтовилучення із пластів в умовах розробки родовища у режимі розчиненого газу / Я.М. Бажалук, О.М. Карпаш, О.І. Гутак та інші. // Матеріали VI міжнародної науково-практичної конференції "Економічне відродження України". – м. Київ, 22 травня 2009. – С. 18-19.

126. Barake S. An experimental and theoretical investigation of the influence of high-frequency acoustic waves on the flow of a liquid through a porous material / Barake S., Bas V.D.F., Ooms G., Poesio P. // Rock Reservoir Workshop EAGE/SEG, Pau, France. 2001.

127. Biot M.A. Theory of propagation of elastic waves in a fluidsaturated porous medium. Low frequency range I. / Biot M.A. // J. Acoust. Soc. Am. – 1956. –№28. – p.141– 167.

128. P. Poesio Formation and ultrasonic removal of fouling particle structures in a natural porous material / P. Poesio, G. Ooms // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2004. – №45. – p.159–178.

129. Venkitaraman A. Ultrasonic Removal of near-wellbore damage caused by fines and mud solid / Venkitaraman A., Roberts P.M., Sharma M.M. // SPE Drilling and Completion. 1995. – p. 193– 197.

130. Poesio P. Study of removal of small particles in porous media by ultrasonic irradiation / Poesio P., Ooms G., Dongen V.M.E.H., Smeulders D.M.J.// Transp. Porous Media. 2004. – №54. – p. 239– 264.

131. Кузнецов О.Л. Применение ультразвука в нефтяной промышленности [Текст] / О.Л. Кузнецов, С.А. Ефимова. М.: Недра, 1983. – 192 с.

132. Подземная гидравлика [Текст] / К.С. Басниев, А.М. Власов, И.Н. Кочина, В.М. Максимов. – М.: Недра, 1986. – 303 с.

133. Физические основы акустического метода воздействия на коллекторы [Текст] / Ю.И. Горбачев, О.Л. Кузнецов, Р.С. Рафиков, А.А. Печков // Геофизика. 1998. –N4.

134. Девликамов В.В. Структурно -механические свойства нефтей некоторых месторождений Башкирии [Текст] / В.В. Девликамов, З.А. Хабибулин // Нефтяное хозяйство. – 1968. – № 10. – С. 38 –41.
135. Щелкачев В.Н. Подземная гидравлика [Текст] / В.Н. Щелкачев, Б.Б. Лапук. – М-Л.: Гостоптехиздат, 1949. – 525 с.
136. Уилкинсон У.Л. Неньютоновские жидкости [Текст] / У.Л. Уилкинсон. – М.: Мир, 1964. – 216 с.
137. Мирзаджанзаде А.Х. Особенности эксплуатации месторождений аномальных нефтей [Текст] / А.Х. Мирзаджанзаде, А.Г. Ковалев, Ю.В. Зайцев. – М.: Недра, 1972. – 200 с.
138. Техника для вибростимуляционного воздействия на призабойную зону [Текст]/ А.Н. Дроздов, Д.Н. Ламбин, А.Г. Молчанов и др. // Территория нефтегаз. – 2007. – №2. – С. 44-45.
139. Шутилов В.А. Основы физики ультразвука [Текст]: учеб. пособие / В.А. Шутилов. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1980. – 280 с.
140. Бажалук Я.М. Дослідження акустичних властивостей менілітових відкладів [Текст] / Я.М. Бажалук, О.М. Карпаш, О.І. Гутак та інші. // Нафтогазова енергетика. – 2008. – № 4(9). – С.53-56.
141. Влияние ультразвуковых колебаний на течение вязко-упругой жидкости [Текст] / С.Л. Пешковский, М.Б. Генералов М.И. Кауфман и др. // Механика полимеров. – 1971. – №6. – С. 1097-1100.
142. Legrand Clande Etude de l'influence de lafrequence de vibration sur les proprietes rheologiques des mélanges de sable on de ciment en d'ean / Legrand Clande, Gourves Roland // «С.г. Acad Sci.», 1973. – N15.– А. 773-776.
143. Калашников Н.В. Вибропрогрев вязких нефтепродуктов [Текст] / Н.В. Калашников, В.И. Черников. – М.: Недра, 1961. – 76 с.
144. Бажалук Я.М. Експериментальні дослідження впливу пружних коливань на умови фільтрації газоводяної суміші в пласті [Текст] / Я.М. Бажалук, О.М. Карпаш, О.І. Гутак та інші. // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2008. – № 4(29). – С. 45-49.

145. Гутак О.І. Експериментальні дослідження впливу пружних коливань на зміну фільтрації нафтоводяної суміші [Текст] / О.І. Гутак // Науковий вісник. – 2011. – №3(29). – С. 53-56.

146. Гутак О.І. Дослідження впливу пружних коливань на зміну фільтрації нафтоводяної суміші в насипній моделі пласта [Текст] / Я.Б. Тарко, Я.М. Бажалук, О.І. Гутак, Я.Д. Климишин // Анотації міжнародної науково-технічної конференції "Нафтогазова енергетика – 2011". – м. Івано-Франківськ, 10-14 жовтня 2011. – С. 36.

147. Бажалук Я.М. Дослідження впливу пружних коливань на проби нафти та нафтонасичені насипні моделі пласта [Текст] / Я.М. Бажалук, О.М. Карпаш, О.І. Гутак, Я.Д. Климишин // Нафтогазова енергетика. – 2011. – № 1(14). – С.11-14.

148. Гутак О.І. Експериментальні дослідження впливу імпульсно-хвильових дій на процеси розгазування нафти [Текст] / Я.Б. Тарко, Я.М. Бажалук, О.І. Гутак та інші // Анотації міжнародної науково-технічної конференції "Нафтогазова енергетика: проблеми та перспективи". – м. Івано-Франківськ, 20-23 жовтня 2009. – С. 50.

149. Гутак О.І. Дослідження розгазування нафти в насипних моделях пласта [Текст] / О.І. Гутак // Збірник матеріалів всеукраїнської науково-практичної конференції "Науково-практичний досвід – 2011". – м. Миколаїв, 17 травня 2011. – С. 84-85.

150. Майер В.В. Простые опыты с ультразвуком [Текст] / В.В. Майер. - М.: Наука, 1978. – 162 с.

151. Мирзаджанзаде А. Х. Математическая теория эксперимента в добыче нефти и газа [Текст] / А.Х. Мирзаджанзаде, Г.С. Степанова. – М.: Недра, 1977. – 228 с.

152. Пат. 49776 Україна, МПК Е 21 В 43 / 24, Імпульсний генератор [Текст] / заявники Бажалук Я.М.; Карпаш О.М.; Гутак О.І. та ін., патентовласник ІФНТУНГ. – № u200911972, заявл. 23.11.09; опубл. 11.05.10, Бюл. № 9.

153. Пат. 45496 Україна, МПК Е 21 В 43 / 24, Пристрій для створення періодичних імпульсів тиску [Текст] / заявники Бажалук Я.М.; Карпаш О.М.; Гутак О.І. та ін., патентовласник ІФНТУНГ. – № u200906132, заявл. 15.06.09; опубл. 10.11.09, Бюл. № 21.

154. Пат. 54283 Україна, МПК Е 21 В 43 / 24, Спосіб підвищення нафтовилучення із виснажених нафтових пластів [Текст] / заявники Бажалук Я.М.; Карпаш О.М.; Гутак О.І. та ін., патентовласник ІФНТУНГ. – № u201002424, заявл. 04.03.10; опубл. 10.11.10, Бюл. № 21.

155. Пат. 92517 Україна, МПК Е 21 В 43 / 24, Спосіб розробки нафтових родовищ [Текст] / заявники Бажалук Я.М.; Карпаш О.М.; Гутак О.І. та ін., патентовласник ІФНТУНГ. – №a200811750, заявл. 02.10.08; опубл. 10.11.10, Бюл. № 21.

156. Бажалук Я.М. Удосконалення технічних засобів імпульсно-хвильової дії на нафтоносні пласти [Текст] / Я.М. Бажалук, О.М. Карпаш, О.І. Гутак та інші. // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2010. – № 1(34). – С. 10-13.

157. Бажалук Я.М. Увеличение отбора нефти путем воздействия на пласты пакетами упругих колебаний [Електронний ресурс] / Я.М. Бажалук, О.М. Карпаш, А.И. Гутак и др. // Электронный научный журнал "Нефтегазовое дело". – 2012. – №3. – С. 185-198.

ДОДАТКИ

Додаток А

КОГ
Вчор
наш
наф
Date 19.12.12

[Handwritten signature]

Затверджено

Директор компанії Західенергобуд

[Handwritten signature]
18.12.2010 р.

АКТ

У період з 08.10.2010 р. по 11.10.2010 р. на свердловині 8 Ст.Самбір проведені роботи з термоакустичного впливу на пласт. Обробка привибійної зони пласта проводилась в інтервалі перфорації 3295-3333 м. з допомогою генератора ТАГ-1 для термоакустичного впливу на нафтонасичений пласт.

Технічні характеристики генератора:

- діапазон частот пружних коливань , Гц - 50 – 10000 ;
- діапазон потужностей випромінювання (у залежності від продуктивності насосного агрегата) , Вт - 1500 – 3000 ;
- максимальний перепад тиску на генераторі, мПа - 15 ;
- максимальна робоча температура , °С - 120 .

Генератор опускався у свердловину на трубах НКТ 73 до нижніх отворів перфорації і поступово підіймався до глибини 3295 м. , при цьому створювалась кругова циркуляція нафти з допомогою насосного агрегата ЦА-320 по схемі: насосний агрегат – труби НКТ 73 – генератор ТАГ-1 – затрубний простір – замірна ємність – насосний агрегат. На протязі часу обробки пласта тиск на насосному агрегаті поступово збільшувався від 3 до 8 мПа. В замірній ємності на викидній лінії через кожні 60 хв.вимірювалась температура нафти. Результати замірів температури наступні:

- 60 хв. - 13 °С ;
- 120 хв. - 13 °С ;
- 180 хв. - 15 °С ;
- 240 хв. - 19 °С .

Дебіт нафти на свердловині 8 Ст.Самбір до обробки становив 3 м³/доб. При контрольному вимірюванні проведеному 16.10.2010 р. дебіт нафти становив 6 м³/доб.

Директор ІНВ



Я.М. Бажалук

Аспірант ІФН
Аспірант ІФНТУНГ

[Handwritten signatures]

М.В. Худін
О.І. Гутак

Додаток Б

Узгоджено
Директор ТОВ «Інтекс»

Бажалук Я.М.
2011 р.

Затверджено
Начальник Калуської НГРЕ

Кузьмич Б.В.
2011 р.

ІНТЕКС
нафти і газу.
19.12.12
Дата
Підпис

АКТ

дослідно-промислових випробувань

«Технології і технічних засобів інтенсифікації видобутку вуглеводнів шляхом різночастотного імпульсно-хвильового впливу та депресійної дії на нафтогазонасичені породи»

Приймальна комісія у складі:

Голова комісії:

Возняк З.В. – головний інженер Калуської НГРЕ;

члени комісії:

Кремінь Я.В. – головний геолог Калуської НГРЕ;

Короць Е.М. – технічний директор ТОВ «Інтекс»;

Гутак О.І. – інженер-технолог ТОВ «Інтекс» (аспірант кафедри РЕНГР ІФНТУНГ);

Худін М.В. – інженер-конструктор ТОВ «Інтекс» (аспірант кафедри НГО ІФНТУНГ);

склали цей акт про те, що станом на 20.08.2011р., в результаті освоєння свердловини 1-Семаківська компресуванням з пониженням рівня до глибини 453 м, отримано незначний приплив нафти об'ємом 0,1 м³. Для покращення зв'язку з пластом та інтенсифікації припливу пластового флюїду в період з 20.08.2011 по 24.08.2011 на свердловині 1-Семаківська були проведені роботи по інтенсифікації видобутку вуглеводнів із використанням технології різночастотного імпульсно-хвильового впливу на нафтогазонасичені породи, з наступним відпомпуванням пластового флюїду на різних режимах з використанням ежекторного насоса УЕОС-2 і виходом на оптимальний режим припливу.

Для виконання даних робіт використовувалися:

- генератор ГКП-1;
- ежекторний насос УЕОС-2;
- пакер ПМКВ-118;

- інше допоміжне обладнання.

Загальний принцип здійснення різночастотного імпульсно-хвильового впливу на пласт. Даний вплив здійснюється за допомогою генерації гідравлічних імпульсів тиску свердловинним пристроєм, за рахунок використання енергії рідини або газу. Генератор спускається в свердловину на колоні насосно-компресорних труб, а напірно-витратні параметри рідини задаються насосними агрегатами. Гідроімпульси тиску, діючи з частотою повторення 30,40,50 Гц на оточуюче свердловинне шарувате середовище (вода-сталь-цемент-пласт), збуджують у пласті хвильові пакети пружних загасаючих коливань певної тривалості, які в своєму спектрі містять діапазони низькочастотних і високочастотних гармонік. Робота високочастотних складових витрачається на зменшення міцності кольматуючого матеріалу і очищення порових каналів ПЗП, усування блокуючого впливу залишкових фаз газу, нафти і води. Робота низькочастотних складових витрачається на зміну реологічних характеристик нафтогазоводяного флюїду та характеру його фільтрації в пласті на відстанях більших радіусу привибійної зони пласта.

Після імпульсно-хвильової дії створюється оптимальна для конкретних геолого-технічних умов депресія на пласт з допомогою стандартних технологій та обладнання з метою видалення кольматанту із ПЗП.

Затримки із створенням депресії на пласт приводять до повторної коагуляції частинок кольматанту (самовідновлення коагуляційних структур) і тим самим до повторного блокування ПЗП.

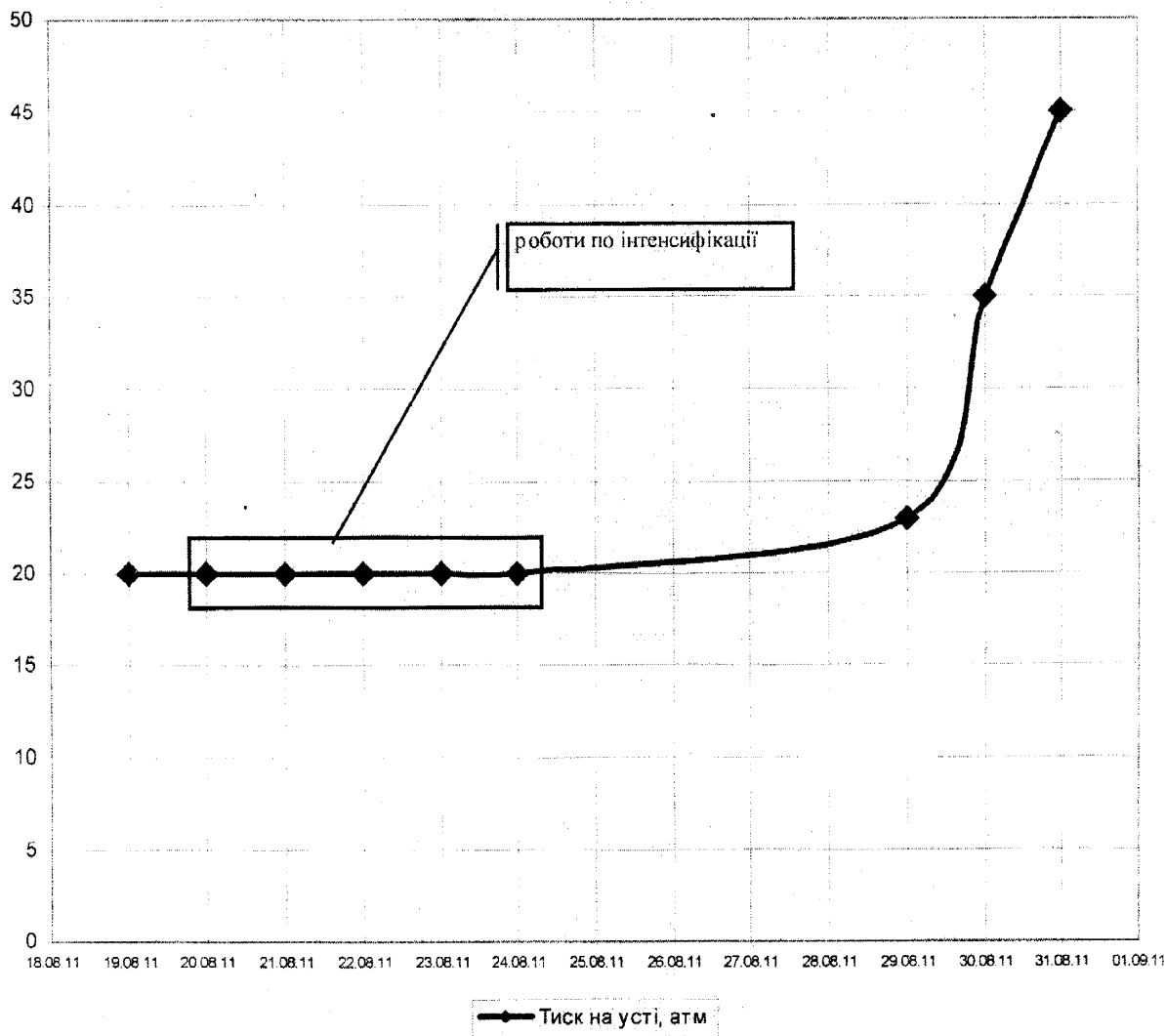
У зв'язку з цим доцільним є використання для створення депресій струминних насосів, які дозволяють в широких межах плавно змінювати вибійний тиск. Конструктивне поєднання гідравлічного генератора імпульсів тиску і струминного насоса дозволяє ефективно очищувати від кольматуючих речовин ПЗП. Після імпульсно-хвильової дії на пласт, з допомогою струминного насоса проводиться вибір оптимального значення депресії, при якій кількість кольматуючих речовин в пробах рідини, що беруться на викиді циркуляційної системи, через рівні проміжки часу, буде мінімальною, а приплив рідини із пласта буде стабільним.

Комісія встановила:

- вважати технологію інтенсифікації видобутку вуглеводнів шляхом різночастотного імпульсно-хвильового впливу на нафтогазонасичені породи такою, що пройшла дослідно-промислові випробування успішно;

- імпульсно-хвильовий вплив на пласт з допомогою генератора ГКП-1, а також створення циклічних регульованих депресій на пласт з допомогою

ежекторного насоса УЕОС-2, дозволили відновити зв'язок свердловини з продуктивними пластами, в результаті чого спостерігався вихід рідини із періодичними пачками газу про що свідчить зростання тиску на усті свердловини 1-Семаківська.



Динаміка зміни тиску на усті свердловини 1-Семаківська.

Голова комісії

Возняк З. В.

Члени комісії:

Юремінь Я. В.

Короць Е. М.

Гутак О. І.

Худін М. В.

Додаток В

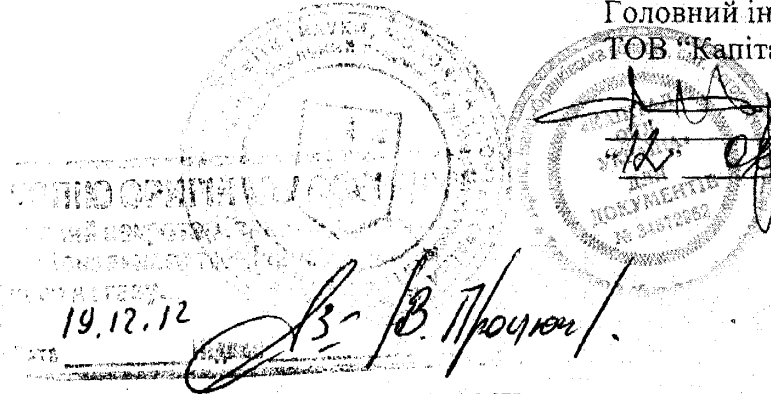
Затверджено

Головний інженер

ТОВ "Капітал Ойл Україна"

Кероць Е.М.

2010 р.



АКТ

промислових досліджень та випробувань технології різночастотного імпульсно-хвильового впливу на нафтогазонасичені породи

У період травень 2009 р. – червень 2010 р. спеціалістами ТОВ "Капітал Ойл Україна", НВФ "Інтекс" та ІФНТУНГ здійснені промислові дослідження та випробування запатентованої розробки за винаходом № 92517 (Спосіб розробки нафтових родовищ) та двох корисних моделей: № 45496 (Пристрій для створення періодичних імпульсів тиску), № 54283 (Спосіб підвищення нафтовилучення із виснажених нафтових пластів).

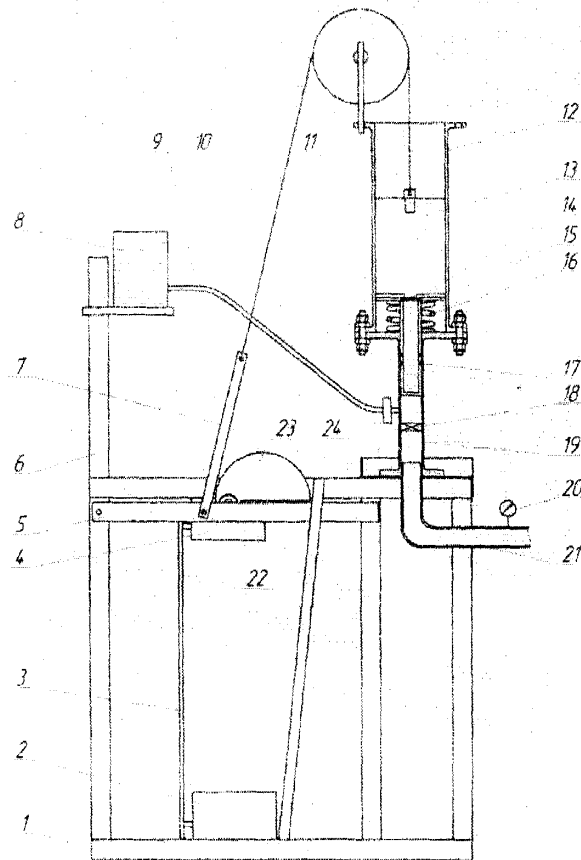
Для досліджень були використані свердловини 1-Кубаш, 3-Кубаш, 5-Кубаш (ділянка Кубаш-Луква Луквинського нафтового родовища).

Мета промислових досліджень.

Розробка пристрою та методики для реалізації лабораторних розробок в промислових умовах. Для цього спроектовано і виготовлено дослідно-промисловий зразок установки імпульсно-хвильової дії на нафтогазонасичені породи ПГУ-3 (рисунок 1).

Випробування технології:

Установка була змонтована на свердловині 1-Кубаш і генерувала періодичні гідравлічні імпульси тиску з частотою повторення 0.6 Гц. Діапазон амплітуд імпульсів тиску – 10-15 МПа. Тривалість переднього фронту імпульсів – 1мс. Імпульси тиску генеровані установкою створювали у пористому нафтонасиченому середовищі пласта поздовжні пружні коливання. Попередньо генератор імпульсів тиску установки регулювався



- 1 - стіл; 2 - електродвигун; 3 - пасова передача; 4 - редуктор; 5 - важіль; 6 - стійка;
 7 - пластина; 8 - ємність з робочою рідиною; 9 - лінія доливу; 10 - трос; 11 - шків;
 12 - напрямна; 13 - бойок; 14 - подушка мідна; 15 - плунжер; 16 - пружина;
 17 - ущільнення плунжера; 18 - клапан центральний; 19 - циліндр; 20 - манометр;
 21 - коліно; 22 - напрямні важеля; 23 - собачка; 24 - клапан доливу

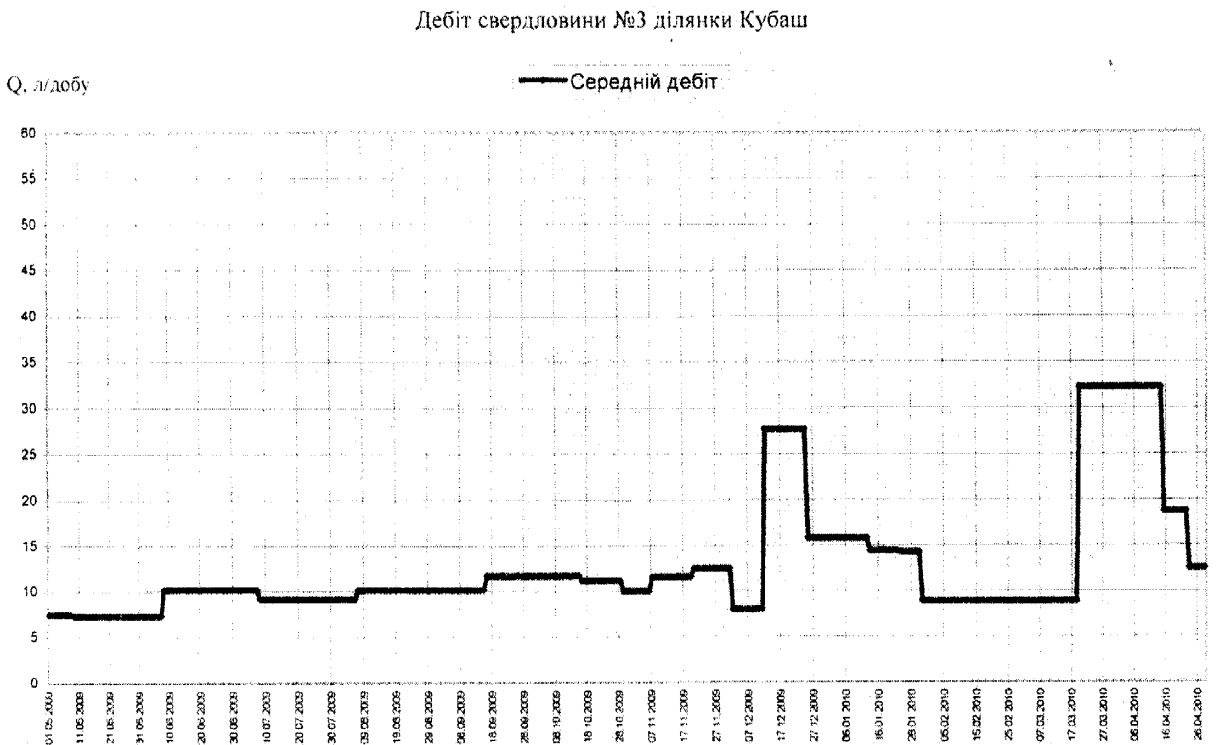
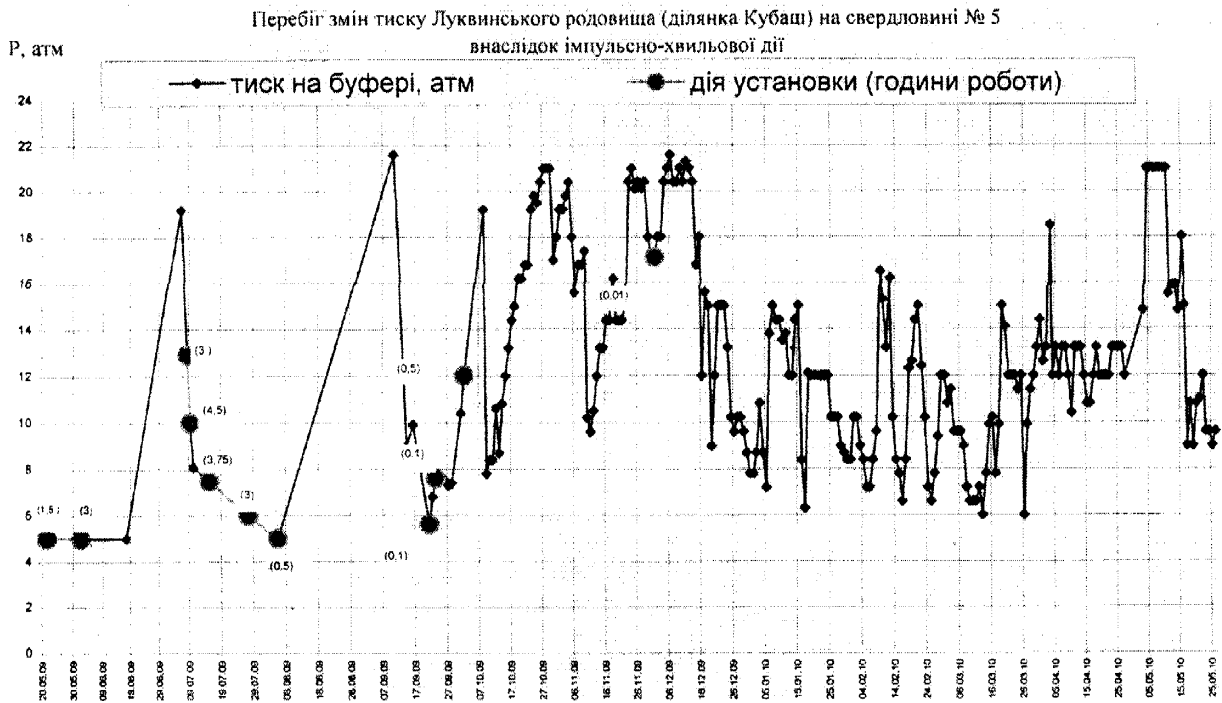
Рисунок 1 – Схема установки ПГУ-3

таким чином, щоб при спектральному розкладі генерованої послідовності імпульсів тиску виділялись гармонічні складові з максимальною енергією коливань у діапазоні частот 10-100 Гц. На буфері реагуючої свердловини 5-Кубаш, яка знаходилась на відстані 70 м від генеруючої свердловини 1-Кубаш, встановлювався прецезійний манометр для реєстрації змін тиску. У свердловині 3-Кубаш, яка знаходилась на відстані 120 м. від свердловини 1-Кубаш, фіксувалися дебїти нафти. До початку запуску установки в експлуатацію тиск на буфері свердловини 5-Кубаш протягом останнього року становив 0,5 МПа.

Результати досліджень та випробувань.

– оцінений вплив пружних коливань на процеси дегазації нафти в пласті у промислових умовах;

– зміна тиску на буфері свердловини №5 і зміна дебїту свердловини №3 у 2009-2010 рр. показана на рисунку 2 і 3.



– за час експлуатації установки ПГУ-3 встановлено залежність між імпульсно-хвильовими діями установки на нафтогазонасичені породи і тиском на буфері реагуючої свердловини;

- в результаті періодичної дії установки тиск на буфері реагуючої свердловини змінювався від середнього мінімального значення 0.6

МПа до середнього максимального значення 2 МПа з періодом приблизно 50 діб.

Можливе промислове застосування результатів досліджень.

Проходження пружних хвиль у нафтогазонасичених породах призводить до первинного вивільнення з нафти газової фази, наступної затримки зворотнього розчинення виділеної газової фази з одночасним її ізобаричним розширенням та просуванням під дією постійно діючого низхідного градієнта тиску і, відповідно, супутнього витіснення пластової суміші в напрямку видобувних свердловин по принципу пластового ліфтування.

Розглянутий спосіб різночастотного імпульсно-хвильового впливу на виснажений нафтовий поклад (гравітаційний режим розробки) дозволяє підвищити коефіцієнт нафтогазовилучення із покладу.



Директор НВФ "Інтекс"

Я.М. Бажалук

Аспірант кафедри НГО ІФНТУНГ

М.В. Худін

Аспірант кафедри РЕНТР ІФНТУНГ

О.І. Гутак



d468