

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

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

До захисту
завідувач кафедри

В. С. Савчук
С. Савчук

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

на тему: «Дослідження ефективності вібраційної технології для видалення
парафінових відкладень у нафтових трубопроводах»

Пояснювальна записка

Керівник

К.т.н., доцент Бугрова Т.М.
посада, наук. ступінь, ПІБ
Бугрова
підпис, дата

Виконавець роботи

Буньковський А.В.
студент, ПІБ
група 2ММН
Буньковський А.В.
підпис, дата

Консультант за 1 розділом

к.т.н. доц. Миколайчук О.В.
Миколайчук О.В.
посада, наук. ступінь, ПІБ, підпис

Консультант за 2 розділом

к.т.н., доц. Сергеев А.
Сергеев А.
посада, наук. ступінь, ПІБ, підпис

Консультант за 3 розділом

Степанюк А.В.
Степанюк А.В.
посада, наук. ступінь, ПІБ, підпис

Дата захисту 20.01.2025

Полтава, 2024

Навчально-науковий інститут нафти і газу
Кафедра нафтогазової інженерії та технологій

Освітньо-кваліфікаційний рівень: Магістр

Спеціальність 185 Нафтогазова інженерія та технології

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри НГІТ

В.О. Згуржидка
“ ” 20 року

З А В Д А Н Н Я
НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Буньковському Андрій Валентиновичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Дослідження ефективності вібраційної технології для видалення парафінових відкладень у нафтових трубопроводах

Керівник роботи Бугрова Тетяна Миколаївна, к.т.н.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від “ 09 ” 08 2024 року № 8189/2

2. Строк подання студентом роботи _____ 20__ року

3. Вихідні дані до роботи 1. Науково-технічна література, періодичні видання, патенти на винаходи. 2. Геологічні звіти за профілем роботи (за необхідності).

3. Проекти розробки родовищ, технологічні схеми облаштування родовищ або інші технологічні схеми за профілем роботи. 4. Паспорти свердловин та обладнання, що експлуатується.

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

Вступ

1 Інформаційно-оглядова частина.

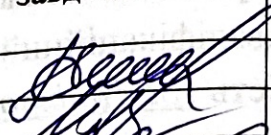
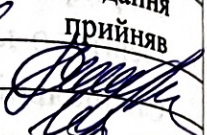
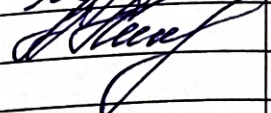
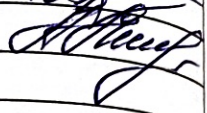
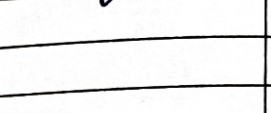

2. Теоретична частина.

3. Моделювання. Експериментальна частина (за необхідності).

4. Впровадження результатів досліджень. Висновки по роботі.

5. Перелік графічного матеріалу

Презентація із демонстрацією результатів наукової роботи, вказати мету роботи, задачі, практичну та наукову новизну та/або цінність, методи (технології) дослідження, аналіз сучасного стану теорії і практики в області боротьби з парафіновими відкладеннями при транспортуванні нафти, план експериментальних досліджень, результати експериментальних досліджень, загальні висновки по роботі.

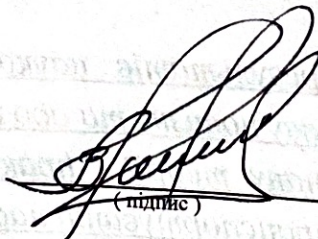
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	к.т.н. доц. Михайловська		
2	к.т.н. доц. Лещевська		
3	Стр. Бугрова Т.М.		

7. Дата видачі завдання 14.10.2024р

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Етапи підготовки	Термін виконання
1	Інформаційно-оглядова частина	14.10-20.10
2	Теоретична частина	21.10-03.11
3	Моделювання. Експериментальна частина.	04.11-17.11
4	Впровадження результатів досліджень	18.11-15.12
5	Оформлення та узгодження роботи	16.12-29.12
6	Попередні захисти робіт	06.01-19.01
7	Захист магістерської роботи	20.01-24.01

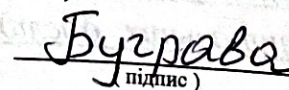
Студент


(підпис)

Буньковський А.В.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи


(підпис)

Бугрова Т.М.

(прізвище та ініціали)

Зміст

Вступ.....	4
РОЗДІЛ 1 Основні напрямки вирішення проблеми видалення парафінових відкладень у нафтових трубопроводах	6
1.1 Проблеми, викликані утворенням і накопиченням відкладень нафти	6
1.2 Механізм утворення парафінових відкладень.....	9
1.3 Утворення відкладень при трубопровідному транспорті нафти.....	15
1.4 Методи боротьби з асфальто-смоло-парафіновими відкладеннями нафти	20
1.5 Ультразвукові хвилі і їх застосування в нафтовидобутку	27
1.6 Аналізування досвіді застосування ультразвуку для видалення ПВ	37
РОЗДІЛ 2 План експерименту для дослідження впливу ультразвукових хвиль на асфальтосмолопарафинисті відкладення	41
2.1 Планування експериментальних досліджень	41
2.1.1 Повний факторний експеримент типу 3^2	42
2.1.2 Властивості повного факторного експерименту типу 3^k	44
2.1.3 Розрахунок коефіцієнтів регресії.....	46
2.2 Прилади та матеріали, які використовувалися для експериментальних досліджень	47
2.3 Методика проведення експериментальних досліджень.....	49
РОЗДІЛ 3 Аналізування результатів експериментальних досліджень.....	55
3.1 Результати експериментів	55
3.2 Статистичний аналіз експериментальних даних	55
3.3 Методика розрахунків основних параметрів ультразвукової обробки	60
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	66

Вступ

У цьому розділі подано короткі пояснення до магістерської роботи за темою: «Дослідження ефективності вібраційної технології для видалення парафінових відкладень у нафтових трубопроводах».

Актуальність роботи.

Парафінові відкладення є однією з ключових проблем у нафтовидобувній та транспортувальній галузях. Вони утворюються через осідання важких вуглеводнів на внутрішніх стінках трубопроводів, що призводить до зниження їхньої пропускної здатності, збільшення енергоспоживання обладнання та виникнення ризику повного блокування потоку нафти. Ця проблема потребує розробки інноваційних, ефективних і екологічно безпечних рішень.

Одним із найперспективніших підходів є застосування вібраційних технологій, які створюють ультразвукові коливання. Такі коливання, завдяки своїй високій частоті та енергії, здатні ефективно руйнувати адгезійні зв'язки між парафіновими відкладеннями та стінками трубопроводів. Ультразвук забезпечує такі корисні ефекти.

Кавітація – утворення і схлопування мікропухирців у рідкому середовищі, що створює локальні зони високого тиску і температури, які руйнують парафінові відкладення.

Механічний вплив – високочастотні коливання фізично відокремлюють відкладення від поверхні труб.

Термічний ефект – локальне нагрівання, яке сприяє розм'якшенню парафіну та полегшує його видалення.

Прискорення хімічних реакцій – ультразвукові хвилі посилюють дію хімічних реагентів, якщо вони застосовуються.

Мета роботи – дослідження ефективності та доцільності використання ультразвукових хвиль, створених вібраційними методами, для обробки ПВ у процесі транспортування та зберігання нафти.

Методи дослідження: експериментальні методи дослідження та методи математичної статистики й теорії ймовірності в аналізі результатів експериментальних досліджень.

Основні задачі досліджень:

– аналіз ефективності існуючих методів запобігання і видалення парафінових відкладень для обґрунтування переваги ультразвукової обробки відкладень в процесі транспорту нафти;

– експериментальні дослідження ультразвукового впливу на зразках парафінів.

Об'єкт дослідження – процес утворення парафінів при трубопровідному транспорті нафти і нафтопродуктів.

Предмет дослідження – вплив ультразвукових хвиль на парафінові відкладення.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

– експериментально встановлено вплив таких параметрів як час ультразвуком взаємодії та частота ультразвуку на процес руйнування парафінових відкладень.

Практичне значення одержаних результатів:

отримано функціональні залежності, які дозволяють підбирати параметри ультразвукової обробки парафінових відкладень.

Особистий внесок автора роботи полягає у:

– проведенні літературного пошуку та його обробці;

– проведенні експериментальних досліджень та статистичній обробці результатів експерименту.

Структура та об'єм роботи. Магістерська робота складається з вступу, 3 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел.

РОЗДІЛ 1 Основні напрямки вирішення проблеми видалення парафінових відкладень у нафтових трубопроводах

1.1 Проблеми, викликані утворенням і накопиченням відкладень нафти

У процесі видобутку нафти та нафтопродуктів утворюються і накопичуються парафінові осади. Вони здатні формувати шар у нижній частині резервуара, що може досягати до 15% його об'єму протягом 60–90 днів. Парафінові утворення класифікуються за складом і являють собою складні багатокомпонентні системи, до складу яких входять нафта, вода (H_2O), неорганічні речовини та механічні домішки. Співвідношення цих компонентів може значно варіюватися.

Усі високомолекулярні компоненти парафінових утворень характеризуються підвищеною температурою застигання, що зумовлює формування дуже в'язких або навіть твердих структур за звичайних умов. Основними складовими смол і асфальтенів є поліциклічні аромоструктури, які містять сірку, кисень (O_2), азот (N_2) та різноманітні мікроелементи.

Нерідко нафтопереробні заводи замість утилізації асфальто-парафінових відкладень (ПВ) вдаються до їх спалювання або поховання на полігонах. Це завдає значної шкоди довкіллю. Отже, однією з ключових проблем нафтової галузі є подолання наслідків утворення великих обсягів ПВ. Ефективне вирішення цього питання сприятиме покращенню якості переробки нафти та зниженню негативного впливу відходів на навколишнє середовище.

Для запобігання утворенню, зменшення обсягу парафінових і асфальто-смолистих відкладень, а також видалення таких осадів та неорганічних солей під час зберігання нафти на нафтоперекачувальних станціях і НПЗ застосовуються хімічні, термічні та механічні методи. При цьому хімічні способи є найбільш поширеними. Наразі за допомогою хімічних засобів

обробляється близько 10% свердловин, які мають ускладнення через ПВ. Утім, використання таких методів суттєво збільшує собівартість видобутої нафти та може погіршувати екологічну ситуацію.

Термічний метод обробки асфальтосмолистих і парафінових відкладень (ПВ) базується на принципі їхньої розрідженості під впливом високих температур, які сприяють руйнуванню структури осади, полегшуючи їхнє усунення. Окрім цього, існують хімічні методи, які використовують спеціальні реагенти, такі як розчинники, деемульгатори та поверхнево-активні речовини, для розпаду відкладень. Ці підходи дозволяють структурувати отримані фракції таким чином, аби їх можна було залучити до подальшої технологічної або економічної переробки. Механічні способи також мають важливе значення і включають інноваційні методи фільтрації, седиментації та розподілу твердих і рідких компонентів [1-4].

Важливим аспектом біологічних методів утилізації ПВ є застосування мікроорганізмів, які використовують вуглеводневі компоненти як живильний субстрат для свого розвитку. Ці процеси стають все більш актуальними завдяки своєму екологічному характеру та можливості одночасного вирішення питання забруднення довкілля.

Важливо зазначити, що ПВ можуть слугувати цінною сировиною у виробництві, зокрема для отримання окисленого або змішаного бітуму, який використовується у дорожньому і будівельному секторах. Проте застосування таких матеріалів має сезонну природу попиту, тому воно не може повністю вирішити проблему їхньої утилізації на довгостроковій основі. Одним із перспективних рішень є використання термодеструктивних методів для обробки відкладень.

Процеси термодеструкції важких вуглеводнів можуть бути реалізовані за двома ключовими сценаріями. Перший передбачає глибоке термічне розщеплення, орієнтоване на максимальний вихід газоподібних продуктів та дистильованих фракцій за мінімального залишку крекінгу. Другий підхід

забезпечує перетворення шляхом коксування, що дозволяє значно збільшити глибину переробки нафти та максимізувати її ефективність.

Асфальтосмолисті і парафінові відкладення представляють одну з найсерйозніших технологічних проблем у процесах видобутку і транспортування нафти. Їх накопичення збільшує опір фільтрації нафтових пластів, закупорює пори у породах та значно зменшує ефективний переріз трубопроводів. Це суттєво скорочує експлуатаційний термін служби свердловин, іноді до критично малих показників усього 1-2 дні. Додатково ускладнюється процес видобутку нафти через підвищення собівартості операцій та скорочення обсягів кінцевого продукту.

Значною проблемою є також екологічний аспект експлуатації високопарафінової сирової нафти, адже ПВ виступають потужними забруднювачами навколишнього середовища. Їхній склад є досить різноманітним і характеризується широкою варіацією вмісту основних компонентів, зокрема парафінів, смол та асфальтенів. Наприклад, високопарафінова сира нафта може містити парафіни у діапазоні від 5% до 70%, тоді як частка смол та асфальтенів може сягати 20 відсотків. Ефективна обробка таких компонентів потребує інтегрованого підходу із залученням інноваційних технологій переробки для мінімізації негативного впливу на довкілля та підвищення економічної ефективності галузі [5-7].

Родовища з великим вмістом неорганічних солей можуть створювати суттєві труднощі для видобутку й транспортування нафти, оскільки ці солі мають властивість накопичуватися на стінках труб і обладнання. Утворювані ними відкладення часто є надзвичайно щільними та стійкими до механічного впливу. Це не лише звужує поперечний переріз трубопроводів, а й може спричинити заклинювання рухомих механізмів, таких як занурені насоси, що нерідко стає причиною їхнього виходу з ладу [8-11].

Досвід показує, що для підвищення продуктивності транспортування високопарафінової сирової нафти та боротьби з відкладеннями ПВ і неорганічних солей ефективно застосовуються спеціальні пристрої, які

генерують потужні магнітні або ультразвукові поля. За останні роки було оприлюднено значну кількість наукових праць, зокрема монографій, доповідей та статей, які детально акцентують увагу на практичній цінності ультразвукової обробки. Також організовано чимало конференцій і нарад, присвячених впровадженню цієї технології у різноманітні галузі промисловості.

1.2 Механізм утворення парафінових відкладень

Однією з найбільш важливих і складних проблем, що виникають у процесі видобутку нафти, є поступове накопичення так званих асфальтосмолистих і парафінових відкладень на внутрішніх стінках трубопроводів, а також у конструкціях насосних агрегатів. Основна причина утворення таких відкладень парафінів полягає в кристалізації високомолекулярних вуглеводнів, яка виникає через зниження температури нафтового потоку. Цей процес негативно позначається на експлуатаційних характеристиках видобувного обладнання: він не тільки зменшує фільтраційні властивості пористого пласта, ускладнюючи текучість рідини, але й поступово звужує корисну площину поперечного перерізу трубопроводів. Зрештою, це призводить до значного ускладнення видобутку нафти, збільшення витрат електроенергії на реалізацію механізованого методу вилучення ресурсів, а також спричиняє надмірний знос обладнання [12].

Окрім суттєвого зниження ефективності насосних агрегатів, накопичення парафінів у свердловинах часто стає причиною аварійних ситуацій. До найбільш поширених наслідків таких явищ належить руйнування штанги насосного обладнання, що автоматично скорочує міжремонтний період експлуатації свердловини і помітно знижує обсяги видобутку [13]. Водночас відкладами парафінів неминуче супроводжуються й інші небажані процеси в ході видобутку. Зокрема, підвищується

обводненість добутої рідини та формується стабільна емульсія в нафтових свердловинах. Основним чинником таких проявів є присутність води у видобуваному флюїді, а також механізм ковзання (відносного руху) нафти щодо водяної фази. Під час цього процесу відбувається збільшення концентрації асфальтосмолистих і парафінових сполук, які акумулюються на поверхні нафтових крапель.

Підйом нафти разом із водою супроводжується поступовою стабілізацією поверхневої плівки та її охолодженням. Це сприяє зростанню в'язкості рідини, яка видобувається, і створює передумови для активного осадження осадків на поверхнях промислового обладнання через їхню високу адгезійну здатність [14]. Для боротьби з асфальтосмолисто-парафіновими відкладеннями (ПВ), а також для мінімізації їхнього впливу на трубопроводи та резервуари використовуються різноманітні методи — механічні, хімічні та фізичні. Однак на практиці ці методи часто виявляються економічно затратними і не завжди забезпечують необхідну ефективність.

Ситуація ускладнюється ще й тим, що більшість проблемних свердловин має похилу конструкцію та характеризується складними умовами експлуатації. Це включає схильність до осадження солей, агресивну хімічну природу середовища і значний газовий фактор, які додатково ускладнюють боротьбу із цими відкладеннями.

Чинники, що ускладнюють своєчасну діагностику парафінових відкладень, водночас унеможливають їх ефективний контроль. Основним напрямом управління такими процесами під час видобутку нафти повинно стати попередження утворення відкладень. Тому розробка інноваційних принципів і методів запобігання парафіновим утворенням залишається актуальним завданням. Її вирішення дозволить зменшити кількість простоїв свердловин, продовжити міжремонтний період їхньої роботи та суттєво збільшити обсяг видобутої нафти.

Контроль за процесом формування асфальтеново-смолисто-парафінових відкладень (ПВ) є надзвичайно складною інженерною

проблемою. Це обумовлено багатокomпонентною природою осаджень, а також недостатньою вивченістю цього явища. У формуванні ПВ беруть участь різноманітні фізичні та хімічні процеси, включаючи осадження механічно зважених частинок, консолідацію і осадження дисперсних компонентів, насичення розчинених молекул із подальшим формуванням кристалів, адсорбцію компонентів системи тощо. Ця складність пояснюється великою кількістю чинників, що впливають на утворення відкладень.

Присутність піщаних і глинистих часток разом із механічними домішками у нафті сприяє утворенню ПВ, часто виступаючи як центри кристалізації парафінів. Особливістю є те, що склад відкладень може суттєво змінюватися навіть у межах одного родовища за однакових умов. Вони відрізняються за вмістом асфальтенів, смол і твердих вуглеводнів. Процес характеризується нерівномірним розподілом парафіну по поперечному перерізу трубопроводів: найбільша концентрація спостерігається у шарах поблизу стінок. Це свідчить про те, що під час накопичення осаджень у внутрішніх шарах парафіни перекристалізуються, ущільнюючи масу; рідка фаза при цьому витісняється.

Профіль наростання відкладень ПВ залежить від діаметра труб і проявляється в поступовому збільшенні товщини шару у напрямку гирла свердловини. Прямого зв'язку між вмістом парафіну в нафті та інтенсивністю його осадів немає. Це можна пояснити тим, що характер утворення залежить не лише від кількості твердих вуглеводнів, а й від їхнього складу, зокрема вмісту вуглеводнів із розгалуженою структурою.

На практиці ПВ — це складна суміш, до якої входять парафіни, стабілізовані водні глобули, механічні домішки та мінеральні солі. Основним компонентом осадів є парафін, але смоли й асфальтени виконують роль цементуючої речовини, що забезпечує структурну міцність відкладень [15].

Механізм утворення парафінових відкладень є складним набором фізико-хімічних процесів, результатом яких стає утворення й накопичення твердої органічної фази на внутрішніх поверхнях технологічного обладнання.

Під поняттям парафінів у цьому контексті, зазвичай, мають на увазі комплекс вуглеводневих компонентів, які входять до складу відкладень, утворених у нафтовій системі. Сучасні теоретичні підходи до опису цього механізму зосереджуються на кількох основних концепціях, які умовно поділяються на осадово-об'ємну теорію, кристалізаційну теорію та змішаний підхід.

Згідно з осадово-об'ємною теорією, процес утворення парафінових відкладень розпочинається у самому об'ємі циркулюючої нафти. В міру зниження температури або за інших сприятливих умов у нафті формуються мікрочастинки парафіну, які потім поступово осідають на металевій поверхні обладнання. У цьому випадку вони прикріплюються до поверхні, утворюючи осадовий шар органічних відкладень, що збільшується з часом.

Кристалізаційна теорія пропонує інший погляд на цей процес. Відповідно до неї, первинне утворення кристалів парафіну відбувається не в об'ємі рідкого середовища, а безпосередньо на металевій поверхні. Тут поступова кристалізація супроводжується формуванням парафінових комплексів, які зростають і консолідуються в щільний осад.

Третя концепція розглядає змішаний механізм, який об'єднує елементи обох описаних вище підходів. Змішаний підхід враховує як об'ємні, так і поверхні процеси утворення й накопичення кристалів парафіну. На цьому рівні особливе значення має стан металевої поверхні, її текстура, енергетичні характеристики та температура. Саме структура і властивості поверхонь здатні суттєво впливати на інтенсивність парафіноутворення.

Щоб сформувалися парафінові відкладення, мають виконуватися певні умови. До основних факторів формування цих осадів належать:

- Наявність у складі нафти високомолекулярних вуглеводневих сполук, передусім парафінів високої молекулярної маси.
- Зниження пластового тиску до рівня тиску насичення, що сприяє появі умов для випадіння твердої фази.
- Зменшення температури потоку до критичних значень, за яких відбувається кристалізація й осідання твердих вуглеводнів.

- Створення холодного шару або охолодженої поверхні з достатньо низькою температурою, на якій високомолекулярні сполуки можуть легко адгезуватися. Важливо зазначити, що сильна адгезія цих сполук до поверхні унеможливує їх видалення з потоком рідини або газової суміші навіть за встановлених технологічних режимів експлуатації.

Окрім зазначених умов, існує також низка інших чинників, які можуть як сприяти інтенсивному утворенню парафінових відкладень, так і стримувати цей небажаний процес. До останніх належать швидкість потоку рідини, рівень вібрації обладнання та застосування спеціальних хімічних реагентів для пригнічення кристалізації. Отже, механізм формування парафінів залишається області складного багатофакторного впливу, що потребує подальших досліджень і вдосконалення методів боротьби з цим явищем.

Основними факторами, які визначають процес утворення парафінових відкладень у нафтових системах, можна вважати такі аспекти, розподілені за їх роллю та впливом:

По-перше, важливу роль відіграють процеси адсорбції, що відбуваються на межі розділу «тверде тіло (метал) – парафін». Ці процеси базуються на природних властивостях парафінових відкладень, які включають у свій склад полімерні сполуки. Адсорбція сприяє фіксації кристалів парафіну на поверхні підвищеної енергетичної активності.

Друге значення мають сторонні утворення, що з'являються на поверхнях осадження. Серед них – продукти руйнування продуктивного пласта, різноманітні механічні домішки, які потрапляють у свердловину під час виконання технологічних операцій, а також продукти корозії металу на внутрішніх стінках трубопроводів. Усі ці фактори створюють додаткові центри агрегації парафінових кристалів.

Третім фактором є шорсткість поверхні металу. Наявність нерівностей та мікроскопічних виступів формує мікрооснову для закріплення кристалів

парафіну. Ці ділянки стають ядрами, навколо яких починають накопичуватись і рости агрегати осаджень.

Швидкість руху газорідної суміші також істотно впливає на процес. Достатньо висока швидкість може запобігти утворенню густих шарів осаду завдяки підвищеному термодинамічному стоку та механічному відриву осадів від поверхонь. Низька ж швидкість сприяє осадженню нових кристалів і їх закріпленню на стінках труб, що особливо актуально для гирлової частини свердловин.

П'ятий важливий аспект – електрокінетичні явища. Вони призводять до електризації як внутрішньої поверхні трубопроводу, так і самих кристалів парафіну. Результатом цього стає посилення їхньої адгезії до металевих стінок, що ускладнює подальше видалення відкладень.

Серед структурних характеристик течії варто звернути увагу на її тип. Найбільші обсяги відкладень фіксують у разі протікання бульбашкового газопоршневого потоку. У такому сценарії газова фаза представлена великими бульбашками, що полегшує накопичення парафіну у вигляді щільних осадів.

Також вагома роль належить охолодженню рідини внаслідок інтенсивної дегазації нафти. Це термодинамічне явище призводить до утворення умов, сприятливих для твердіння парафіну, через зниження температури потоків.

Нарешті, низький рівень обводненості продуктивного пласта є додатковим ключовим чинником. Коли кількість пластової води невелика, теплоємність рідини у свердловині знижується. Це, в свою чергу, прискорює охолодження середовища і запобігає утворенню гідрофільного шару на внутрішній поверхні трубопроводу, що могло б зменшити осадження асфальтено-смолисто-парафінових відкладень (ПВ).

Таким чином, усі наведені фактори діють у комплексі, формуючи складний механізм утворення та розвитку парафінових відкладень у системах

видобутку нафти. Для ефективної боротьби з цим явищем необхідно враховувати специфіку кожного з них.

1.3 Утворення відкладень при трубопровідному транспорті нафти

Парафін, смоли та асфальтени, що містяться в нафті, переважно складаються з парафінових вуглеводнів ($C_{18}-C_{36}$) і нафтових вуглеводнів ($C_{30}-C_{60}$). Молекули цих сполук можуть формувати як прямі, так і розгалужені вуглеводневі ланцюги, включаючи деякі циклічні або ароматичні вуглеводні. Вуглеводневі компоненти парафіну здатні перебувати в різних фазах – газоподібній, рідкій або твердій – залежно від зовнішніх умов, таких як температура і тиск. У процесі замерзання парафін утворює кристали. Кристали, що складаються з парафінових вуглеводнів, відносяться до макрокристалічних парафінів (рисунок 1.1), тоді як ті, що походять із нафтенів, класифікуються як мікрокристалічні парафіни (рисунок 1.2) [1].

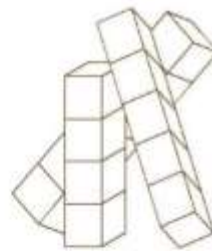


Рисунок 1.1 – Макрокристал парафінових відкладень

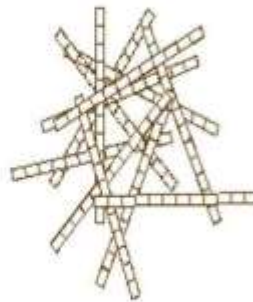


Рисунок 1.2 – Мікрокристал парафінових відкладень

Коли температура сирої нафти знижується нижче певного порогу, який називається температурою кристалізації парафіну, починається процес осадження молекул парафіну. Температура кристалізації парафіну визначається як та точка, при якій відбувається випадання першого кристала парафіну з рідкої фази. У цьому стані молекули парафіну поступово починають утворювати впорядковану тверду матрицю. Ця структура має властивість захоплювати частки нафти, перетворюючи її на напівтвердий стан, що нагадує гелеподібну субстанцію. Такий процес може значно ускладнювати транспорт нафти через трубопроводи, спричиняючи збільшення втрат тиску в системі.

Послідовність кристалізації складається з двох ключових етапів: зародження (нуклеації) та зростання. У міру того як температура знижується, енергія молекул у нафті також спадає, що призводить до уповільнення їх руху. Це створює сприятливі умови для того, щоб молекули парафіну згрупувалися й вирівнялися, поступово прикріплюючись одна до одної. Після досягнення критичного розміру ці угруповання стають стабільними й відомі як ядра процесу кристалізації. Ядра залишаються в стабільному стані лише тоді, коли температура продовжує залишатися нижчою за точку плавлення парафіну.

На наступному етапі ядра слугують центрами для подальшого осадження молекул парафіну. Цей процес, який отримав назву зростання, призводить до того, що молекули поступово додаються до вже сформованих ядер. У результаті цього утворюються більші й щільніші структури.

Примітно, що зміна тиску зазвичай не має значного впливу на температуру кристалізації чи кількість відкладень парафіну. Однак випадання парафіну не завжди супроводжується його осадженням. Окремі кристали можуть залишатися диспергованими в нафтовій рідині замість того, щоб осідати на поверхні. Проте за певних умов, таких як значна кількість кристалів або наявність домішок, таких як асфальтени, дрібні частинки корозії чи інші тверді мікрооб'єкти, кристали здатні об'єднуватися у більші

формування. Коли ці формування досягають певного розміру, вони стають недостатньо стабільними для перебування в рідкій фазі й осідають у вигляді твердих відкладень.

Процес осадження парафіну характеризується утворенням шару твердої фази, який безпосередньо контактує з нафтовою рідиною. Подальший розвиток цього шару може забезпечуватися завдяки різним фізичним механізмам. Серед них виділяють механізми дисперсії зсуву, гравітаційного осадження і броунівського руху, які стосуються вже обложеної твердої фази парафіну. Одночасно відкладення може формуватися і з розчинених молекул парафіну через механізм молекулярної дифузії.

Цей складний багатофакторний процес залишається одним з ключових викликів для нафтової промисловості через його вплив на ефективність транспортування й переробки сировини [16-17].

Нафтові парафінові відкладення є складними багатокомпонентними утвореннями, до складу яких входять нафта, вода, смоли, пісок і асфальтени, причому їх пропорції та характеристики визначаються природою конкретної нафти. Процес утворення цих відкладень починається, коли нафта, яка виходить з резервуару при температурі, що перевищує її точку кристалізації, стикається з холодною поверхнею стінки трубопроводу. При цьому відбувається миттєве випадіння певних компонентів в осад, формуючи цільний шар відкладень на стінці. Утворений осад володіє пористою структурою, через яку частина нафти залишається пов'язаною із загальним потоком. Ця захоплена нафта взаємодіє з більш важкими вуглеводнями, що спричиняє зміни в її складі порівняно з потоковою нафтою.

Одним із важливих показників цього процесу є так зване критичне число атомів вуглецю, яке позначає мінімальну кількість атомів вуглецю в молекулах важких вуглеводнів. У відкладеннях спостерігається збільшення частки молекул із кількістю атомів вуглецю, що перевищує критичне число, в той час як частка молекул із меншим числом атомів зменшується. Ці трансформації супроводжуються явищами дифузії та контрдифузії, які

сприяють ущільненню шару осаду, зростанню його розмірів та збільшенню кількості парафіну. Цей складний процес носить назву "старіння" або "зміцнення" осаду та характеризує другий етап парафінового осадження.

Процес формування парафінових відкладень обумовлений численними факторами, ключовими серед яких є температура та склад нафти. Температура є надзвичайно важливим і часто визначальним фактором, оскільки розчинність парафіну залежить саме від температурного режиму. При зниженні температури розчинність парафіну помітно зменшується, що сприяє його випадінню в осад. Коли температура навколишнього середовища або стінок трубопроводу стає нижчою за температуру кристалізації нафти, починається інтенсивне утворення парафінових відкладень. Таким чином, температурний градієнт між нагрітою нафтою в трубопроводі та холодним зовнішнім середовищем відіграє вирішальну роль у формуванні цих відкладень.

Склад нафти також має безпосередній вплив на схильність до утворення парафінових відкладень, а отже, і на її стабільність. Нафта складається із суміші насичених (парафінових) і ароматичних вуглеводнів, смол і асфальтенів. Насичені компоненти відіграють центральну роль у процесах осадження ПВ. Зокрема, нормальні парафіни, будучи прямоланцюговими молекулами, найчастіше кристалізуються через високу здатність до кластеризації. Ізопарафіни мають подібну тенденцію до утворення осаду, але їх відкладення менш стабільні у порівнянні із нормальними парафінами. Водночас циклопарафіни (нафтени), через їх циклічну структуру, проявляють найнижчу гнучкість і відіграють незначну роль у формуванні осадів. Це різноманіття компонентів пояснює складну природу процесів осадження та необхідність врахування хімічного складу нафти при оцінці ризиків або розробці методик боротьби з парафіновими відкладеннями.

Тиск є одним із ключових параметрів, що відіграють важливу роль у процесах експлуатації пластових флюїдів, особливо у формуванні

асфальтено-смолопарафінових відкладень (ПВ). Профіль тиску в умовах видобутку нафти характеризується поступовим зниженням пластового тиску, водночас тиск потоку майже повністю знижується на поверхні. За таких умов легкі компоненти пластової рідини зазвичай відокремлюються від нафти, коли тиск падає, що збільшує частку розчинника, оскільки саме легкі вуглеводні виконують функцію розчинників для елементів ПВ. Втрата цих компонентів викликає зменшення розчинності парафіну.

Температура кристалізації парафінів зростає при збільшенні тиску, якщо він перевищує точку пароутворення за незмінного складу рідини. Таким чином, у випадку однофазного стану рідини (тобто вище точки пароутворення), підвищення тиску може сприяти осадженню парафіну. Однак ситуація змінюється при знаходженні поблизу точки кипіння – у зоні двофазного існування. Тут, зі зростанням тиску, температура появи ПВ навпаки знижується через повторне розчинення легких вуглеводнів у рідкій фазі.

Швидкість потоку також суттєво впливає на ці процеси. В умовах турбулентного потоку домінуючу роль відіграють динамічні сили, які спричиняють змішування окремих шарів струменя вздовж осі труби. Натомість у режимі ламінарного потоку основна роль належить силам в'язкості; при цьому змішування між шарами фактично не відбувається.

Співвідношення газ/нафта є ще одним істотним фактором, що визначає характер осадження парафіну залежно від тискового режиму. У межах однофазного середовища вище точки пароутворення розчинений газ сприяє утриманню парафіну в нафті. Зменшення газового фактора підвищує температуру кристалізації парафінів. Водночас високий газовий фактор може спричинити сильніше розширення рідини й подальше охолодження через зниження її тиску, що в певних умовах ускладнює проблему утворення ПВ.

1.4 Методи боротьби з асфальто-смоло-парафіновими відкладеннями нафти

Сучасна промисловість використовує широкий спектр методів для ефективного вирішення проблем, пов'язаних із ПВ, як ілюструється на рисунку 1.3. Загалом ці підходи можна поділити на дві основні категорії: заходи превентивного характеру, спрямовані на попередження утворення відкладень, та методи, орієнтовані на усунення вже сформованих нашарувань. Кожен із зазначених підходів має свої особливості, що дозволяють адаптувати їх до різних умов і вимог виробництва [16].



Рисунок 1.3 – Класифікація методів боротьби з ПВ

Розглянемо фізичні методи впливу на нафту. Вони базуються на дії, спрямованій на руйнування асоціатів, що формуються парафіновими вуглеводнями. Завдяки таким методам можна значно покращити властивості нафти за низьких температур, а також запобігти утворенню осадів парафіну.

До фізичних методів також відносяться вібраційні методи. Вібраційні методи дозволяють створювати ультразвукові коливання.

Ультразвукові коливання створюються за допомогою вібраційних методів, які використовують механічні або електромеханічні перетворювачі для передачі високочастотних коливань у середовище. Ці коливання мають частоту вище порогу чутності людини (зазвичай понад 20 кГц) і володіють унікальними фізичними властивостями, які широко застосовуються у промислових процесах, включаючи очищення нафтових трубопроводів.

За принципі створення ультразвукових коливань перетворювачі бувають.

П'єзоелектричні перетворювачі. Використовують п'єзоелектричні матеріали (наприклад, кераміку або кварц), які генерують механічні коливання під впливом змінної електричної напруги.

Магнітострикційні перетворювачі. Ці пристрої працюють за рахунок зміни форми магнітострикційних матеріалів (наприклад, сплавів заліза з нікелем) під впливом змінного магнітного поля.

Резонансні коливання. Ультразвук підсилюється в резонансній системі, коли частота генератора збігається з резонансною частотою перетворювача та середовища.

Використання ультразвукової технології є особливо ефективним для високов'язких видів. За даними різних джерел, зокрема [18], цей метод дозволяє знизити в'язкість до 1,8 разу, при цьому позитивно впливаючи на реологічні характеристики нафти, не змінюючи її хімічного складу.

Крім того, ультразвукові коливання сприяють переміщенню кристалів парафінів у зоні їх утворення, що допомагає уникнути осадження парафінів.

Ще одним прикладом фізичних методів є застосування магнітної обробки, яка реалізується через використання магнітних активаторів, або так званого магнітодинамічного ефекту. Цей ефект виникає, коли заряджена частинка рухається в постійному магнітному полі. У результаті колоїдні частинки феромагнетиків, таких як феромагнітне залізо, зазнають

руйнування та подрібнення. Це, у свою чергу, впливає на центри зростання кристалів парафіну, збільшуючи їх кількість і сприяючи активнішій кристалізації.

Феромагнітні мікрочастинки, перебуваючи під впливом магнітного поля, розпадаються на більш дрібні компоненти разом із зв'язками та агрегатами, у яких вони присутні. Один такий агрегат може налічувати від кількох сотень до тисяч мікрочастинок. При їх руйнуванні число кристалізаційних центрів для утворення парафінів і солей різко зростає. Це підвищує загальну концентрацію центрів і сприяє формуванню газових бульбашок на поверхнях частинок феромагнетиків. Таким чином, парафін випадає у вигляді об'ємної тонкодисперсної суспензії, яка є стійкою до осадження. Водночас швидкість утворення відкладень значно знижується завдяки зменшенню середнього розміру парафінових кристалів.

Однак важливо зазначити, що практичне впровадження фізичних методів має певні обмеження. Зокрема, досить складно забезпечити оптимальні умови для такого типу обробки. Крім того, експериментальні дослідження показують, що ефективність цих методів іноді буває недостатньою.

Переходячи до хімічних методів контролю парафіноутворення, слід зазначити, що найпоширенішим серед них є використання спеціальних хімічних реагентів. Ці речовини активують процеси адгезії та абсорбції на межах поділу фаз, таких як «нафта - метал» або «нафта - дисперсна фаза». Ключовою перевагою цього методу є здатність покращувати реологічні властивості нафти, що призводить до підвищення її стійкості проти утворення відкладень різного характеру.

Розглянемо тепловий метод боротьби з відкладенням парафіну. Процес випадання парафіну значною мірою залежить від температурного режиму, тому термічні методи можуть бути надзвичайно ефективними як для запобігання виникненню відкладень парафінів, так і для їх усунення. Одним

із найпоширеніших способів є використання гарячої нафти. Додатково до нафти можна вводити диспергатори для покращення ефективності процесу.

Високомолекулярні парафінові сполуки, зазвичай, осідають у нижній частині свердловини, де температура вища, тоді як парафіни з меншою молекулярною масою схильні до осадження в стовбурі свердловини при зниженні температури. У міру руху нафти до поверхні її температура падає, однак розчинність парафінів зростає. Тому важливо правильно дозувати концентрацію парафінів для забезпечення їх розчинення та плавлення на необхідній глибині.

Обробка гарячою водою не забезпечує рівня розчинності, притаманного методу усунення парафінових відкладень гарячою нафтою. У зв'язку з цим часто використовуються поверхнево-активні речовини (ПАР), які сприяють дисперсії парафіну в рідкій фазі. Комбінований підхід, що об'єднує застосування гарячої рідини та ПАР, дозволяє створити суспензію твердих частинок завдяки біполярній взаємодії між поверхнево-активною речовиною та межевою поверхнею води й парафіну. Основною перевагою такого підходу є те, що вода має вищу питому теплоємність порівняно з нафтою, тому зберігає високу температуру довше й дозволяє ефективніше впливати на відкладення.

Слід зазначити, що використання поверхнево-активних речовин відноситься до хімічних методів боротьби з ПВ, які буде розглянуто далі.

Прямий нагрів є одним із найефективніших методів боротьби з відкладеннями, оскільки базується на передачі значних обсягів електричного струму через стінки трубопроводу з метою створення теплової енергії. Цей спосіб є найбільш оптимальним та надійним для польових умов. У даному підході труба функціонує як активний провідник у конструкції однофазного електричного кола, що включає одножильний силовий кабель, який виступає як прямий провідник. Живлення подається за допомогою двох кабелів: один з них під'єднаний до ближнього кінця трубопроводу, тоді як інший з'єднується через передній конвеєрний кабель із дальнім кінцем труби. У результаті

утворюється замкнутий контур, де обидва кінці трубопроводу підключені до живлення, забезпечуючи ефективну циркуляцію струму. У процесі проходження струму виникає падіння напруги, яке призводить до теплових втрат, спрямованих безпосередньо на нагрівання трубопроводу.

Для забезпечення оптимальної ефективності систему прямого нагріву проєктують так, щоб температура текучого середовища залишалася вищою за температуру кристалізації парафіну навіть у разі вимкнення обладнання. Крім того, нагрів дозволяє швидко підвищити температуру середовища від рівня температури навколишнього середовища до необхідних значень протягом визначеного інтервалу часу. Таким чином, у сталому режимі роботи безперервний нагрів може не потребуватися, що робить цей метод ще економічно вигіднішим.

Щодо застосування хімічних реагентів, методи використання розчинників належать до найдієвіших способів запобігання та видалення асфальтено-смолисто-парафінових відкладень (ПВ). Однак при цьому вони є одними з найдорожчих, тому їх зазвичай використовують лише за умови неефективності інших технологій. Основними групами розчинників, що застосовуються на нафтових родовищах, є аліфатичні та ароматичні сполуки. Аліфатичні розчинники — це лінійні або циклічні вуглеводні (як-от дизельне паливо чи гас), тоді як ароматичні розчинники мають структуру з делокалізованим π -зв'язком (такими є, наприклад, ксилол і толуол). Використання суміші ксилолу або толуолу з аліфатичним розчинником істотно підвищує ефективність видалення парафіну завдяки синергетичному впливу обох типів речовин.

Додавання поверхнево-активних речовин здатне підвищувати ефективність розчинників шляхом посилення дисперсійного впливу на парафіни. Деякі інші розчинники, наприклад бензол, хлоровані вуглеводні чи дисульфід вуглецю, також демонструють високий рівень дії. Водночас багато з цих сполук мають значні екологічні недоліки. Також вони нерідко характеризуються ризиками, пов'язаними з низькими температурами

спалаху, як у випадку з ароматичними розчинниками, або здатністю викликати корозію.

Модифікатори працюють на молекулярному рівні, зменшуючи здатність молекул парафіну формувати мережеві структури. Це запобігає утворенню кристалічної решітки всередині нафтопродуктів. Завдяки модифікаторам знижується в'язкість нафти та міцність твердих відкладень. Проте їх специфічною особливістю є висока молекулярна маса, яка зумовлює підвищену температуру застигання. Через це застосування модифікаторів може обмежуватися у регіонах із холодним кліматом.

Диспергатори, які є окремим типом поверхнево-активних речовин, впливають безпосередньо на кристали парафіну, не допускаючи їхнього осадження в нафтопродуктах. Вони покращують властивості нафти, зокрема знижують її в'язкість та міцність відкладень. Диспергатори розщеплюють тверді парафінові осади на дрібніші частинки, які легко переносяться нафтовим потоком. Використовувати ці речовини можна або безперервно, або періодично для усунення існуючого осаду. Вони вирізняються низькою температурою застигання, що робить їх придатними для роботи в умовах холодного клімату. Застосування диспергаторів потребує низьких концентрацій, і вони можуть бути виготовлені у водних чи вуглеводневих розчинах. Завдяки цьому вони є відносно безпечними у використанні та економічно вигідними.

Поверхнево-активні речовини належать до широкого класу хімічних сполук, які часто використовують для очищення резервуарів, трубопроводів, обладнання та інших місць із вмістом парафінів. Їх часто комбінують із методами очищення за допомогою гарячої нафти чи води, що забезпечує додатковий ефект очищення та посилює загальну ефективність процедур.

Під час термохімічної обробки застосовується тепло, що утворюється внаслідок екзотермічної реакції, для ліквідації парафінових відкладень у свердловинах або трубопроводах. Система генерації азоту (NGS), відома португальською як "Sistema Gerador de Nitrogênio" (SGN), розроблена

компанією Petrobras у 1992 році, представляє собою методику термохімічного очищення. Ця технологія базується на локальному змішуванні двох хімічних компонентів з метою ініціювання екзотермічної реакції, що супроводжується теплотою та шипінням, завдяки чому парафінові відкладення ефективно усуваються. У зоні дії трубопроводу два водні розчини, що містять азот, змішуються для утворення газоподібного азоту й теплової енергії (рисунок 1.4) [17].

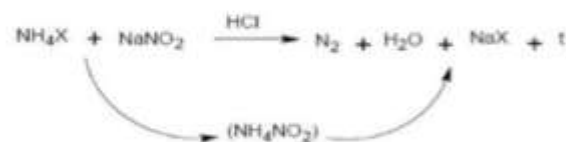


Рисунок 1.4 – Термохімічна реакція для видалення відкладень

Процес NGS поєднує термічні, хімічні та механічні впливи для контролю генерації газоподібного азоту, що сприяє розчиненню парафінів. Компанія Petrobras першою застосувала екзотермічну хімічну реакцію між хлоридом амонію та нітритом натрію в кислому середовищі для отримання тепла, яке дозволило розтопити парафінові відкладення в басейні Кампос.

Основним недоліком цієї технології є обмеження її дії лише тими зонами, які перебувають у безпосередній близькості до місця введення хімічних реагентів, оскільки екзотермічна реакція завершується ще до досягнення віддаленіших районів. Для вирішення цієї проблеми компанія Halliburton розробила технологію SureTherm, яка дозволяє керувати початком екзотермічної хімічної реакції, генеруючи тепло після визначеного часу затримки. Завдяки такому підходу хімічні речовини отримують достатньо часу для переміщення по трубопроводу в задану точку, де згенероване тепло ефективно використовується для розчинення парафінових відкладень.

Максимально допустимі температури, а також цільові робочі значення залежать від двох факторів: тиску в трубопроводі та концентрації реагентів. Технологія SureTherm може застосовуватися як у режимі онлайн (під час виробничого процесу), так і в автономному режимі (при тимчасовому

зупиненні потоку) і була успішно випробувана у польових умовах в Західній Африці для одного клієнта Halliburton. Використання SureTherm забезпечило достатню кількість тепла для видалення парафінових осадів у трубопроводах; механізм затримки реакції продемонстрував стабільну роботу, а реакція відбувалася саме у зоні накопичення парафінових відкладень.

1.5 Ультразвукові хвилі і їх застосування в нафтовидобутку

У суцільному середовищі – будь то газ, рідина чи тверде тіло – якщо частинки цього середовища виходять із стану рівноваги, пружні сили, які взаємодіють між частинками, сприятимуть поверненню їх до початкового положення. У процесі цього частинки починають коливатися. Розповсюдження таких пружних коливань у середовищі проявляється у вигляді хвильового процесу.

Колівання з частотами в діапазоні від кількох одиниць до 20 Гц називаються інфразвуковими. Колівання з частотами від 20 Гц до 16-20 кГц формують звукові хвилі, які сприймаються людським слухом. Ультразвукові хвилі охоплюють частоти в межах від 16-20 кГц до 108 МГц, а коливання з частотами вище 108 МГц мають назву гіперзвукових.

Незважаючи на різні частотні діапазони, фізична природа пружних коливань залишається однаковою. Для глибшого розуміння сутності цих явищ слід звернути увагу на їх характеристики. Зокрема, форма хвилі визначається формою хвильового фронту – умовної поверхні, що охоплює сукупність точок із однаковою фазою коливань.

Якщо площина здійснює коливання, виникає плоска звукова хвиля. У випадку, коли випромінювач має форму циліндра, що періодично розширюється та стискається в радіальному напрямку, формується циліндрична хвиля. Малий точковий випромінювач, наприклад пульсуюча кулька, розміри якого значно менші за довжину хвилі, генерує сферичну

ХВИЛЮ.

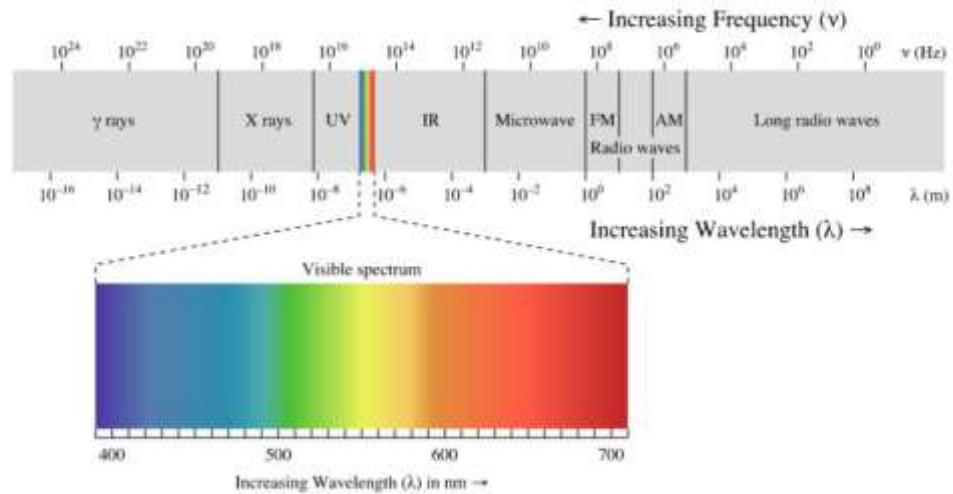


Рисунок 1.5 – Діапазон пружних коливань в матеріальних середовищах

У процесі кавітації в розчині формуються мікроскопічні бульбашки, які поступово збільшуються завдяки впливу змінних хвиль тиску - позитивних і негативних. Ці бульбашки продовжують рости до досягнення свого резонансного розміру. Безпосередньо перед імпульсією бульбашки (див. рисунок 1.6) всередині її об'єму накопичується значний запас енергії.

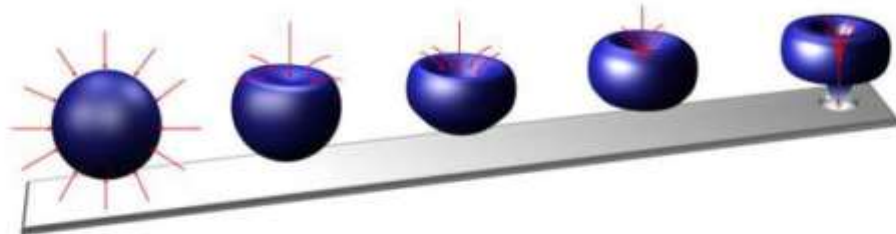


Рисунок 1.6 ілюструє кавітаційну бульбашку, створену ультразвуковим полем. В її середині може досягатися надзвичайно висока температура при тиску, що сягає до 500 атмосфер. Коли бульбашка розривається поблизу твердої поверхні, її об'єм трансформується у вузький струмінь, розмір якого становить приблизно одну десяту від початкового об'єму бульбашки. Цей струмінь рухається з неймовірною швидкістю до 400 км/год прямо до поверхні. Завдяки потужному поєднанню високого тиску, температури і

середовищем обмежує успіх цього підходу. У дослідженні описано механізм впливу ультразвукового випромінювання, яке викликає деформацію стінок пор у вигляді рухомих поперечних хвиль. Ці хвилі генерують потоки рідини всередині пор, що підтверджується теоретичними розрахунками. Результати свідчать про значний вплив стисливості рідини, жорсткості стінок пор і вихідної потужності на індуковані потоки.

Лабораторні дослідження підтвердили утворення потоків під дією ультразвуку. В одному з експериментів вода зі швидкістю майже 1 см/с протікала через гумову капілярну трубку радіусом 0,15 мм під впливом ультразвукового джерела частоти 20 кГц. Порівняння експериментальних даних із теоретичними розрахунками дозволило виявити роль перистальтичного механізму транспорту у стимуляції акустичних свердловин [12].

Розроблено ультразвуковий модуль для нафтових свердловин і відповідну технологію стимуляції для збільшення нафтовіддачі пластів. Оптимізовано параметри ультразвукових випромінюючих систем для свердловинного обладнання, що підтверджено польовими випробуваннями на нафтових родовищах США. Результати демонструють високу ефективність розробленого обладнання та технологій. Вони пропонуються нафтовидобувним компаніям як перспективний метод стимуляції свердловин для підвищення продуктивності пластів.

Технологія акустичної стимуляції свердловин (AWS) [13] базується на використанні високоінтенсивних звукових хвиль у специфічних частотних діапазонах для підвищення продуктивності пошкоджених або низькодебітних свердловин. Завдяки її дії високопотужний ультразвук здатний зменшувати пошкодження привибійної зони, покращуючи проникність у відповідно оброблених ділянках. AWS вважається однією з найбільш перспективних інновацій у нафтовій і газовій галузях. У рамках спільного проєкту компанії Klamath Falls Inc. і Rocky Mountain Oilfield Testing Center (RMOTC) було проведено серію тестувань із застосуванням потужного ультразвукового

обладнання для стимулювання видобутку нафти і газу. Перший етап експериментів підтвердив можливість генерації стабільного ультразвукового сигналу із заданою потужністю, що передавався без втрат та без ризику надмірного нагрівання обладнання. Другий етап включав два додаткові тестування, які продемонстрували ефективність пристроїв AWS у підвищенні продуктивності пошкоджених та малодобітних свердловин [14].

Однією з ключових проблем нафтовидобувної промисловості є осадження асфальтенів. Їх накопичення поблизу свердловини, всередині трубопроводів чи на поверхневому обладнанні, такому як сепаратори, спричиняє значні труднощі. Таке явище суттєво знижує проникність і обмежує рух флюїдів від пласта до поверхні, що своєю чергою призводить до втрат продуктивності. Усунення наслідків осадження асфальтенів вимагає чималих витрат як фінансових, так і часових.

Дослідження, представлене у роботі [15], було спрямоване на експериментальне оцінювання потенціалу ультразвукової технології як інгібітора флокуляції асфальтенів, а також на кількісне визначення зниження їх вмісту в сирій нафті після ультразвукової обробки. Для досягнення цієї мети було проведено серію експериментів, включаючи ультразвукову обробку, вимірювання в'язкості й видалення асфальтенів із сирової нафти.

Провівши це експериментальне дослідження [15], були зроблені висновки про те, що ультразвукові хвилі мають здатність руйнувати конгломерати асфальтенів і, отже, знижувати вміст асфальтенів в пробах сирової нафти і що існує оптимальний час для сонікації, при якому досягається розклад частинок найвищих асфальтенів. Крім того, зроблено висновок про те, що на в'язкість сирової нафти впливає зміст асфальтенів.

Явище статистично значущого зниження статичної межі текучості важкого нафтового продукту, нормалізованої до фонові температури, було зафіксовано в пристінному шарі обертової труби. Цей ефект спричиняється зсувними ультразвуковими коливаннями труби на частоті 25 кГц. Виявлення

явища відбулося за допомогою моделювання на лабораторній установці при температурах від $-13\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-17,5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Величина ефекту становить близько 19% за акустичної потужності ультразвукових коливань порядку $0,002\text{ Вт/см}^2$. Це відкриття має практичне значення для зменшення екстремальних навантажень на етапах запуску насосів технологічних трубопроводів.

Дослідження, проведені в Університеті Альберти, демонструють, що вплив ультразвукових хвиль має потенціал підвищувати нафтовіддачу завдяки зміні капілярного ефекту і міжфазного натягу. Експерименти в моделях Хелі-Шоу із використанням нафтопродуктів підтвердили суттєві зміни в морфології рідин під дією ультразвуку. Попри оптимістичні результати, залишаються відкритими питання щодо механізмів і ключових параметрів, які забезпечують додаткове вилучення нафти.

Були проведені експерименти з оцінки застосування високоінтенсивних акустичних джерел для ліквідації пошкоджень у стовбурі свердловини, спричинених органічними відкладеннями (парафіни і асфальтени) та полімерами (гідроксипіліпсоль, ГЕК). Дослідження засвідчили, що під час використання акустичних хвиль створюється механічне перемішування, яке ефективно запобігає накопиченню парафінів та відновлює проникність порід до початкового стану за порівняно короткий період часу. Глибина обробки сягає приблизно 12-15 см, що підтверджує дієвість технології для очищення свердловини та прилеглої зони з використанням розчинників або без них.

Водночас використання акустики виявилось менш ефективним у відновленні проникності порід, пошкоджених полімерами (ГЕК). Лише незначне покращення (у 1,5 рази) проникності спостерігалось для погано змішаних і добре змішаних полімерів.

Аналіз діапазонів частот і акустичних інтенсивностей дозволив уточнити технічні вимоги до конструкції польових перетворювачів. У новий

наскрізний інструмент трубопроводу було включено 8 таких сенсорів, і тепер він доступний для польових випробувань.

Результати засвідчили перспективність застосування ультразвукової очищення для боротьби з парафіновими відкладами під час обслуговування свердловин. Цей метод може особливо ефективно використовуватися для очищення довгих пластових ділянок (горизонтальних свердловин), де хімічні методи виявляються економічно невиправданими.

У нафтових пластах після первинного та вторинного видобутку залишається близько 60% початкових запасів нафти через вплив геологічних та фізичних факторів. Вдосконалення методів збільшення нафтовіддачі дозволяє отримати додаткові обсяги нафти, проте універсального підходу, який би підходив для будь-якого пласта, не існує. Через це активно розробляються альтернативні теоретичні методи із зниженим ризиком застосування. Одним із таких перспективних підходів є використання звукових і ультразвукових хвиль для зменшення міжфазного натягу між нафтою та водою, що може призвести до зниження капілярного тиску в порових просторах.

Лабораторні дослідження проводилися на кернових зразках для визначення ефективності ультразвукових хвиль у процесі вилучення залишкової нафти. Зразки піддавалися горизонтальному та вертикальному затопленню, а хвильова стимуляція застосовувалася як для вихідної нафти, так і для залишкових запасів після звичайного водного витіснення. Було розраховано відносні проникності нафти і води для оцінки ефективності затоплення за наявності та відсутності хвильової стимуляції, а також визначено швидкість вилучення нафти. Окремо вивчалися криві течії води для аналізу середньої насиченості після прориву води при впливі ультразвукових хвиль і без них. Додатково було проаналізовано вплив хвильової стимуляції на неконсолідовані породи.

Результати показали, що хвильова стимуляція значно підвищує ефективність вилучення залишкової нафти завдяки низці механізмів.

Узаємодія ультразвукових хвиль із рідинами в пористих середовищах спричиняє зміни відносної проникності порід. Спрямоване застосування хвильової стимуляції при залишковій нафтонасиченості забезпечило значно вищий видобуток нафти, що робить цей метод рекомендованим для використання у виснажених пластах.

В останні роки результати польових і лабораторних досліджень демонструють, що високоінтенсивна акустична стимуляція сприяє збільшенню нафтовіддачі в продуктивних пластах. Ця технологія потребує незначних капітальних витрат і забезпечує швидкий приріст видобутку без використання додаткових реагентів. Проте, попри значний накопичений обсяг емпіричних і теоретичних даних, широке впровадження методу гальмується недостатністю фундаментальних і експериментальних досліджень, а також через складність фізичних процесів, які лежать в основі методу.

Метою дослідження [14] є аналіз впливу високочастотного високоінтенсивного ультразвуку на процес змішування нафти у капілярних середовищах. На початковому етапі проводилися експерименти з подачею рідини через вертикально розташований капіляр. У капіляр вводилася вода, яка перебувала у контакті з різними обробленими мінеральними маслами та гасом. Було виміряно середню швидкість фільтрації рідини за різних інтенсивностей ультразвуку, і встановлено, що цей показник залежить від густини масла та міжфазного натягу між водою і маслом.

Друга серія експериментів включає досліді за методикою Хелі-Шоу, спрямовані на дослідження нестабільності на межі розподілу «рідина-рідина» під впливом ультразвуку. Для кількісного оцінювання ступеня апікатури та розгалуження використовували методи фрактального аналізу, що дозволяє приблизно оцінити рівень збурень, які виникають на межі поділу. Поряд із цим наведено експерименти Хелі-Шоу, що демонструють вплив виключно капілярних сил. Було встановлено, що ультразвук сприяє стабілізації

міжфазового фронту, причому цей ефект найпомітніший за умов низьких співвідношень в'язкості.

Хоча вплив ультразвукової енергії на багатофазний потік у пористих середовищах активно вивчався впродовж останніх десятиліть, фізичні механізми акустичної взаємодії рідин із гірськими породами все ще залишаються недостатньо дослідженими. Глибше розуміння фізичних принципів, що регулюють видобуток нафти за допомогою ультразвукових хвиль, має ключове значення для розробки інноваційних методологій нафтовидобутку.

Різноманітні механізми сприяють збільшенню припливу нафти через пористе середовище за присутності акустичного поля. До них належать капілярно-обумовлені механізми перистальтичного транспорту внаслідок механічних деформацій стінок пор, зниження капілярних сил завдяки руйнуванню поверхневих плівок, утворення нових меж у порах, коалесценція нафтових крапель через ефект Бьєркнеса, коливання та зміна стану капілярно-затиснених нафтових крапель, сили, що виникають у кавітаційних бульбашках, а також сонокапілярні ефекти.

Лабораторні дослідження проводили з використанням зразків пісковика Бере та вапняку Індіани. Насичені нафтою керни поміщали в ультразвукову ванну для контакту з водною фазою. Швидкість відновлення через капілярне просочення фіксували в часі.

Експерименти продемонстрували суттєве підвищення кінцевого ступеня відновлення (до 15%) і незначне збільшення швидкості відновлення за рахунок ультразвукових впливів. Для точнішого опису інкрементного відновлення під впливом ультразвукових хвиль для різних пар рідин і типів гірських порід використовували модифіковану версію експоненційної моделі кривих відновлення.

Визнано необхідність подальшого дослідження поведінки асфальтенів у сирій нафті та оптимізації методів боротьби з відкладеннями у пористих

середовищах. Запропоновано проведення масштабних теоретичних і експериментальних досліджень для вдосконалення технологій видобутку.

Для досягнення визначених дослідницьких цілей було здійснено проведення трьох серій експериментів, спрямованих на аналіз впливу ультразвукової обробки на властивості сирої нафти та пов'язаних з нею матеріалів. У ході першої серії досліджень використовували 18 однотипних зразків сирої нафти, які характеризувалися початковим вмістом асфальтенів на рівні 2,47 мас. %. Ці зразки піддавали ультразвуковій обробці протягом різних часових інтервалів — 0, 5, 10, 15, 25 та 30 хвилин, а також за різних температурних режимів, відповідно 25 °С, 40 °С і 60 °С. Під час дослідження проводилося вимірювання в'язкості нафти, а також отримували мікроскопічні зображення центрифугованих зразків, що дало змогу оцінити особливості структури асфальтенових кластерів.

У другій серії експериментів увага була спрямована на аналіз взаємодії толуолу, доданого до сирої нафти у концентраціях 5 об. %, 10 об. % і 15 об. %, з ультразвуковою обробкою. Використовували загалом 12 однакових зразків, які піддавали випробуванням при чотирьох різних часових проміжках і змінних температурних параметрах. Дослідження дозволили уточнити вплив толуолу на властивості нафтових систем у процесі ультразвукової дії.

Третя серія експериментів була спрямована на вивчення впливу ультразвуку на проникаючу здатність карбонатних кернів із пошкодженою проникністю, викликаною закачуванням сирої нафти. Було використано сім таких зразків, які піддавались обробці ультразвуковими хвилями у різних часових інтервалах (5, 10, 15, 20 і 25 хвилин) та за частотами 10, 15 і 20 кГц. Перед початком експерименту та після завершення ультразвукової обробки здійснювалися вимірювання нафтової проникності цих зразків. Крім того, для аналізу структури матеріалу проводили отримання зображень за допомогою скануючого електронного мікроскопа.

Результати проведених досліджень однозначно підтвердили, що вплив ультразвукової обробки сприяє зменшенню розмірів асфальтенових кластерів у складі сирової нафти. Також були виявлені певні покращення проникності карбонатних кернів та ймовірне зниження структурної агрегації компонентів сирової нафти.

1.6 Аналізування досвіду застосування ультразвуку для видалення ПВ

Очищення резервуарів для тривалого зберігання нафти від залишків нафтопродуктів є однією з найбільш актуальних і важливих задач експлуатації таких ємностей. У процесі збереження нафтопродуктів у резервуарах відбуваються різноманітні фізико-хімічні зміни, такі як окислення, розклад, розшарування під впливом температури довкілля, насичення нафтової маси вологою, а також хімічна та біологічна деградація. Це призводить до поступового накопичення нафтових відкладень на внутрішніх поверхнях резервуарів. Подібні відкладення складаються переважно з важких вуглеводнів парафінового ряду, які мають більшу густину порівняно з нафтою та водою. Такі відкладення формують на стінках і днищі ємності щільну, нетекучу парафінову масу, яка перетворюється на воскоподібну речовину.

Цей осад значно ускладнює рух нафти всередині резервуара, створюючи перешкоди для її рівномірного перемішування. Унаслідок цього у резервуарі утворюються локалізовані осередки агресивних сольових розчинів, що сприяє розвитку корозійних процесів, особливо у зоні днища та нижніх поясів ємності. Окрім цього, накопичення осаду зменшує корисний обсяг резервуара, що негативно впливає на його експлуатаційні характеристики. В результаті погіршується якість як нафти, так і нафтопродуктів, які в подальшому заливаються у цю ємність.

Парафінові відкладення можуть розплавлятися лише при температурах вище 40 °С. Із зниженням температури у резервуарі та підвищенням вмісту парафінів у нафтопродуктах зростає їхня в'язкість, а також виникають початкові зсувні напруження. Через це одним із найпоширеніших методів очищення й депарафінізації стає застосування технологій термічної обробки. Для цього використовують ТЕНи, індукційні нагрівачі або гарячий теплоносії.

Одним із найбільш поширених способів усунення парафінових відкладень у резервуарах є застосування ручного методу очищення. Ця техніка передбачає кілька етапів, кожен з яких виконується послідовно для досягнення прийняттого результату. Насамперед, накопичений твердий парафіновий осад перетворюється на рідкий стан шляхом нагрівання, після чого його відкачують за допомогою спеціального обладнання. Для забезпечення більш ретельного очищення резервуар заповнюється піском, який використовується як абразивний матеріал для механічного видалення залишкових забруднень. Коли тверді залишки повністю усунуто, проводиться пропарювання внутрішніх поверхонь резервуара, а потім ретельне промивання гарячою водою, температура якої може досягати 50 °С, під тиском від 0,2 до 0,3 МПа. У процесі роботи утворюється промивальна вода, насичена парафіновим осадом, яку також відкачують за допомогою насосів.

Хоча основною метою цього методу є саме очищення резервуара, а не відновлення сирої нафти, його ефективність у плані вилучення вуглеводнів залишається майже нульовою. Окрім низької продуктивності в частині отримання корисних ресурсів, цей спосіб має суттєві недоліки, що стосуються ризиків для здоров'я робітників, значного впливу на навколишнє середовище та утворення великих обсягів нафтовідходів. Вирішення питання транспортування та безпечного захоронення таких відходів стає додатковим викликом. До того ж, метод сприяє виникненню чималої кількості

нафтошлаків, які потребують подальшої утилізації, що ще більше ускладнює загальний процес.

Серед інших способів видалення парафінових відкладень варто відзначити гідрохімічний метод, який базується на промиванні резервуарів гарячою водою з додаванням спеціальних хімічних реагентів або інгібіторів. Цей спосіб характеризується певними перевагами завдяки використанню активних хімічних сполук, які сприяють розчиненню осадів. Ще одним варіантом є механічний метод очищення, що передбачає використання різноманітних пристроїв та інструментів, таких як сопла, мішалки чи скребки, які ефективно видаляють відкладення з внутрішніх поверхонь нафтоосховищ. Кожен із цих методів має свої особливості та сфери застосування залежно від обсягу роботи, складу відкладень та умов експлуатації резервуарів.

Під час хімічного очищення резервуарів використовуються дорогі реагенти, які знижують температуру застигання та в'язкість парафінових відкладень. Хімічний розчинник проникає у відкладення та руйнує їхні молекулярні зв'язки. Залежно від обсягу резервуара та кількості парафінових залишків, процес очищення може тривати від 6 до 8 тижнів. Проте, за необхідності, цей метод дозволяє завершити операцію усього за 10 хвилин, адже резервуар не потрібно залишати відкритим. До основних недоліків хімічного способу належать висока вартість реагентів, забруднення продукту, а також необхідність додаткового очищення миючих розчинів та утилізації використовуваних хімічних засобів.

Механізоване очищення резервуарів здійснюється шляхом подачі води під високим тиском за допомогою гідромоніторів, пропарювання верхніх поверхонь резервуарів перегрітою парою протягом кількох днів із подальшим механічним видаленням залишків. Також застосовуються апарати для струминно-абразивного очищення. Хоча цей метод не потребує значних фінансових витрат та виключає важкі роботи, що можуть бути небезпечними для здоров'я, він має свої недоліки. Зокрема, необхідність витрачання

великої кількості теплової енергії на підігрів води, обов'язкове перекачування її на очисні споруди, а також суттєві втрати легких фракцій, що залишаються у відкладеннях.

Наведеним методам притаманна значна матеріальна затратність, тривалий час виконання робіт, невідповідність сучасним вимогам безпеки та екології. Їх ефективність також залишається недостатньо високою через потребу у чисельних повторних операціях. Через це питання розробки нових високоефективних способів видалення накопичених відкладень досі є актуальним.

Аналіз застосування ультразвуку дозволяє припустити його потенційну ефективність у боротьбі з асфальтосмолопарафіновими відкладеннями у нафто сховищах. У межах даного дослідження було проведено серію експериментів для з'ясування механізмів його дії, визначення характеру та масштабів впливу ультразвукових полів на нафтові відкладення. Метою стало встановлення можливостей та оптимальних параметрів застосування ультразвукового методу для обробки щільних і важко усувних нафтових утворень.

Висновки за розділом 1

Аналіз існуючих методів боротьби з нафтовими відкладеннями в трубопроводах показав відсутність ефективної технології, яка б усувала відкладення без зміни складу нафти та зупинки обладнання. Теплові методи малоефективні через обмеження температур експлуатації, а прогрів до температур нижче плавлення парафінів не лише не дає бажаного ефекту, але й може збільшити відкладення через активізацію процесів тепло- і масообміну.

Дослідження впливу ультразвуку на тверді поверхні та успішний досвід його застосування для обробки свердловин свідчать про можливість використання цього методу для диспергування осадів у резервуарах та очищення трубопроводів.

РОЗДІЛ 2 План експерименту для дослідження впливу ультразвукових хвиль на асфальтосмолопарафинисті відкладення

Для вивчення властивостей ультразвукових хвиль у досліджуваній області було вирішено провести багатофакторний експеримент. На користь цього підходу свідчить низка його переваг:

- висока ефективність у порівнянні з методами, де фактори змінюють по одному, що значно прискорює здобуття результатів;
- можливість врахування взаємодій між факторами, що дозволяє уникнути хибних висновків і підвищити точність дослідження;
- здатність оцінювати вплив окремих факторів на різних рівнях інших змінних, що забезпечує отримання результатів, релевантних для широкого діапазону експериментальних умов.

2.1 Планування експериментальних досліджень

Роботу з планування експерименту розпочинають із збору апіорної інформації. Аналіз цієї інформації допомагає сформувати уявлення про параметри оптимізації, чинники впливу, найсприятливіші умови для проведення дослідження, а також про властивості поверхні відгуку тощо. Апіорну інформацію можна отримати з літературних джерел, опитувань фахівців або за допомогою виконання однофакторних експериментів. Однак останній метод не завжди доступний через високі витрати на дослідження чи значну тривалість процедур.

На основі аналізу зібраної апіорної інформації обирають експериментальну область у просторі чинників. Це передбачає визначення основного (нульового) рівня та інтервалів варіювання чинників. Основний рівень служить відправною точкою для розробки плану експерименту, тоді як інтервали варіювання встановлюють відстані вздовж осей координат між верхнім і нижнім рівнями щодо основного рівня.

Під час планування експерименту значення чинників кодують через лінійне перетворення координат у просторі чинників, зміщуючи початок координат до нульової точки та встановлюючи масштабування осей відповідно до інтервалів варіювання. Для цього використовують відповідні співвідношення.

$$x_i = \frac{c_i - c_{0i}}{\varepsilon}, \quad (2.1)$$

де x_i – кодовано значення фактора (безрозмірна величина);

$c_i - c_{0i}$ – натуральне значення фактора (відповідно поточне значення та на нульовому рівні);

ε – натуральне значення інтервал у варіювання факторів (ΔC).

2.1.1 Повний факторний експеримент типу 3^2

Перший етап планування експерименту для побудови моделі базується на варіюванні на трьох рівнях. У цьому випадку, знаючи кількість факторів, можна визначити число досліджень, необхідних для реалізації всіх можливих комбінацій рівнів факторів. Формула розрахунку кількості досліджень у такому випадку виглядає так: $N = 3^k = 3^2 = 9$ (досліджень).

Експеримент, у якому враховуються всі можливі комбінації рівнів факторів, називається повним факторним експериментом (ПФЕ). Якщо кількість рівнів кожного фактора дорівнює трьом, то отримуємо ПФЕ типу 3^k .

Алгебраїчне представлення цього процесу можна також зобразити графічно. В області визначення факторів розташовується точка, що відповідає основному рівню, через яку проводяться нові осі координат, паралельні осям натуральних значень факторів. Потім вибираються масштаби для нових осей таким чином, щоб інтервал варіювання кожного фактора дорівнював одиниці. У результаті умови проведення досліджень формують вершини багатогранників: квадрата при $k = 2$ і куба при $k = 3$.

Центр цих фігур відповідає основному рівню, а кожна сторона дорівнює подвоєному інтервалу варіювання. Номери вершин квадрата чи куба відповідають номерам досліджень у матриці планування. Простір, обмежений цими геометричними фігурами, називається областю експерименту. За аналогічним принципом розташовуються експериментальні точки при $k > 3$.

Якщо для двох факторів всі можливі комбінації рівнів можна легко отримати перебором, то зі збільшенням кількості факторів виникає потреба у методах побудови матриць. Зазвичай використовуються три методи, які ґрунтуються на переході від матриць меншої розмірності до матриць більшої розмірності.

Перший метод передбачає, що при додаванні нового фактора кожна комбінація рівнів початкового фактора повторюється двічі – у поєднанні з вищим і нижчим рівнями нового фактора. Тож логічно записати початковий план для одного рівня нового фактора, а потім повторити його для другого рівня. Цей метод є універсальним для матриць будь-якої розмірності.

У другому методі використовується принцип множення стовпців матриці. При послідовному перемноженні рівнів матриці створюється додатковий стовпець із добутком $x_1 * x_2$. Потім початковий план повторюється, але знаки в стовпці добутків змінюються на протилежні. Цей метод також підходить для будь-яких розмірностей матриць, хоча є складнішим за перший.

Третій метод базується на чергуванні знаків. У першому стовпці знаки змінюються по черзі, у другому – через два рази, у третьому – через чотири рази, у четвертому – через вісім і так далі відповідно до ступенів двійки.

Умови експерименту найзручніше оформлювати у вигляді таблиці, яка називається матрицею планування експерименту (табл. 2.1). У нашому випадку варіювалися два фактори: ультразвукова обробка з інтервалом часу 10, 15 і 20 хвилин і частотами 20, 30 та 40 кГц. Для зручності позначимо ці

фактори літерами, де інтервал часу – t , а частоту звуку – f . Прийняті умовні позначення заносяться до табл. 2.2.

Таблиця 2.1 – Матриця планування експерименту 3^2

№ експерименту	Фактор 1			Фактор 2		
	-1	0	+1	-1	0	+1
1	+			+		
2	+				+	
3	+					+
4		+		+		
5		+			+	
6		+				+
7			+	+		
8			+		+	
9			+			+

Таблиця 2.2. – Прийняті позначення

Фактори	Час обробки, хв.	Частота звуку, кГц	Маса ПВ, в долях
Прийняті позначення	t	f	m
Позначення в плані повнофакторного експерименту	X1	X2	Y
Верхня межа (+1)	20	40	-
Основний рівень (0)	15	30	-
Нижня межа (-1)	10	20	-

2.1.2 Властивості повного факторного експерименту типу 3^k

Повний факторний експеримент належить до числа найефективніших підходів для побудови лінійних моделей. Його оптимальність забезпечується завдяки низці визначальних властивостей, які роблять цей метод надзвичайно

дієвим.

Дві ключові характеристики безпосередньо пов'язані зі структурою матриці експерименту. Перша з них полягає у симетричності відносно центру експерименту. Це означає, що алгебраїчна сума елементів кожного стовпчика-вектора, відповідного окремому фактору, дорівнює нулю

$$\sum_{j=1}^N x_{ij} = 0, \quad (2.2)$$

де $i = 1, 2, 3, \dots, k$ – номер фактора,

N – число дослідів.

Друга характеристика, відома як умова нормування, визначається наступним чином: сума квадратів усіх елементів у кожному стовпці дорівнює кількості проведених експериментів, або

$$\sum_{j=1}^N x_{ij}^2 = N, \quad (2.3)$$

Це пов'язано з тим, що значення факторів у матриці визначаються як $+1$ та -1 . Ми вже проаналізували особливості кожного окремого стовпця матриці планування. Тепер перейдемо до розгляду властивостей їх сукупності.

Сума добутків елементів будь-яких двох векторів-стовпців матриці завжди дорівнює нулю, або $\sum_{j=1}^N x_{ij} x_{uj} = 0$, при $i \neq u$ а також $i, u = 1, 2, 3, \dots, k$

Ця ключова характеристика називається ортогональністю матриці планування. Четверта і завершальна властивість отримала назву ротатабельності. Вона означає, що точки в матриці планування вибираються таким чином, щоб точність прогнозування параметра оптимізації залишалася однаковою на однаковій відстані від центру експерименту, незалежно від напрямку.

Дотримання цих умов забезпечує не лише мінімізацію дисперсії коефіцієнтів регресії, але й рівномірність самої дисперсії, що значно спрощує проведення статистичного аналізу результатів експерименту.

2.1.3 Розрахунок коефіцієнтів регресії

Після побудови матриці планування переходять до проведення експерименту. На основі отриманих під час експерименту даних здійснюють розрахунок значень коефіцієнтів регресії, які лежать в основі подальшого аналізу. Значення вільного члена, позначеного як b_0 , визначають шляхом обчислення середнього арифметичного всіх значень параметра оптимізації, що представлені у створеній матриці.

Це дозволяє забезпечити точність моделі та використати отриману інформацію для побудови адекватного рівняння регресії

$$b_0 = \frac{\sum_{i=1}^N y_u}{N}, \quad (2.4)$$

де y_u – значення параметра оптимізації в u -м досліді;

N – число дослідів у матриці.

Лінійні коефіцієнти регресії обчислюються за допомогою такої формули:

$$b_i = \frac{\sum_{i=1}^N x_{iu} \cdot y_u}{\sum_{i=1}^N x_{iu}^2} = \frac{\sum_{i=1}^N x_{iu} \cdot y_u}{N}, \quad (2.5)$$

де x_{iu} – кодоване значення фактора x_i в u -м досліді.

Коефіцієнти регресії, які описують парну взаємодію між факторами, визначаються за допомогою такої формули:

$$b_{ij} = \frac{\sum_{i=1}^N x_{iu} \cdot x_{ju} \cdot y_u}{\sum_{i=1}^N x_{iu}^2} = \frac{\sum_{i=1}^N x_{iu} \cdot x_{ju} \cdot y_u}{N}, \quad (2.6)$$

Рівняння регресії при $k=3$.

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_1^2 + b_4 x_2^2 + b_{12} x_1 x_2 \quad (2.7)$$

де b_0 – вільний член;

b_1, b_2, b_3 – лінійні коефіцієнти;

b_{12}, b_{13}, b_{23} – коефіцієнти подвійної взаємодії;

b_{123} – коефіцієнт потрійної взаємодії.

Загальна кількість усіх можливих коефіцієнтів регресії, до яких належать як лінійні коефіцієнти, так і коефіцієнти взаємодій будь-якого порядку, співпадає з числом дослідів у повному факторному експерименті. Для визначення кількості взаємодій певного порядку слід застосувати формулу комбінаторики для обчислення числа сполучень

$$C_k^m = \frac{k!}{m!(k-m)!}, \quad (2.8)$$

де k – число факторів;

m – число елементів у взаємодії.

Отже, згідно з планом, кількість парних взаємодій становить 3^2

$$C_3^2 = \frac{3!}{2!(3-2)!} = \frac{3!}{2!1!} = 3,$$

З цього випливає, що зі збільшенням кількості факторів кількість можливих взаємодій стрімко зростає.

2.2 Прилади та матеріали, які використовувалися для експериментальних досліджень

Для дослідження впливу ультразвуку на ПВ було застосовано такі пристрої: ультразвуковий очищувач, електронні ваги, цифровий термометр з виносним сенсором та сучасний цифровий мікроскоп. Ультразвуковий очищувач моделі ВАКУ ВК3550 представлено на рис. 2.1.



Рисунок 2.1 – Ультразвуковий очищувач ВАКУ ВК3550

Металеві пластини служили зразками для дослідження. Спочатку їх зважували на електронних вагах перед покриттям полімерним матеріалом (див. рисунок 2.6). Після цього однакова кількість полімерного покриття наносилася на кожну пластину.



Рисунок 2.6 – Зразок до експериментальних досліджень

Зразки поміщалися в ультразвуковий очишувач, конструкцію якого зображено на рисунку 2.7. Усі дослідження виконувались відповідно до встановлених параметрів, визначених у матриці планування експерименту. Після завершення кожного окремого експерименту зразок ретельно просушувався для видалення залишкової вологи, а потім повторно зважувався для визначення зміни його маси. Різниця між початковою масою покриття ПВ і масою після експерименту дозволяла обчислити обсяг матеріалу ПВ, який відокремився від поверхні зразка під час впливу. У підсумку результати експерименту систематизували у вигляді таблиці, де вказувався відсоток пошкодженого або зруйнованого покриття ПВ по відношенню до його загальної маси, нанесеної перед проведенням експерименту.



Рисунок 2.12 – Просушена пластина після досліджень

Висновки за розділом 2

Експериментальні дослідження були проведені із застосуванням методології планування експерименту, що дозволило скоротити кількість дослідів до дев'яти, не поступаючись точністю отриманих даних і забезпечуючи адекватність встановлених залежностей. Заплановано повнофакторний експеримент третього порядку з трирівневими факторами, що відповідає структурі експериментів формату 3к.

Для аналізу впливу ультразвукового випромінювання виконали двофакторний експеримент, у якому варіювали два фактори на трьох рівнях: час ультразвукової обробки (10, 15 і 20 хвилин) та частоту ультразвукового впливу (20, 30 і 40 кГц).

РОЗДІЛ 3 Аналізування результатів експериментальних досліджень

3.1 Результати експериментів

У ході експериментальних досліджень були визначені величини маси полімерних відкладень (ПВ), що відокремлювалися під впливом ультразвукової взаємодії (Y) за умов варіювання двох ключових факторів: тривалості взаємодії (X1) та частоти ультразвукових коливань (X2). Відповідні дані наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Результати експериментальних досліджень

№	t, хв.	f, кГц	X1	X2	X1·X2	X1·X1	X2·X2	Y1, долі	Y2, долі	Y3, долі
1	10	20	-1	-1	+1	+1	+1	0,115	0,13	0,15
2	10	30	-1	0	0	+1	0	0,178	0,17	0,18
3	10	40	-1	+1	-1	+1	+1	0,202	0,25	0,21
4	15	20	0	-1	0	0	+1	0,153	0,18	0,15
5	15	30	0	0	0	0	0	0,214	0,22	0,24
6	15	40	0	+1	0	0	+1	0,453	0,45	0,48
7	20	20	+1	-1	+1	-1	+1	0,359	0,42	0,35
8	20	30	+1	0	+1	0	0	0,632	0,64	0,62
9	20	40	+1	+1	+1	+1	+1	0,779	0,7	0,75

3.2 Статистичний аналіз експериментальних даних

Статистичний аналіз даних здійснюється за допомогою програмного забезпечення STATISTICA. Оскільки кожен експеримент у кожній точці проводився тричі, для подальшого дисперсійного аналізу (згідно з таблицею 3.2) обчислюється середнє значення Y.

Таблиця 3.2 – Дані статистичного аналізу

план	Блок	t, хв.	f, кГц	m1	m2	m3	ср
1	1	15,00000	40,00000	0,453	0,45	0,48	0,461
2	1	20,00000	30,00000	0,632	0,64	0,62	0,630667
3	1	10,00000	20,00000	0,115	0,13	0,15	0,131667
4	2	10,00000	30,00000	0,178	0,17	0,18	0,176
5	2	20,00000	40,00000	0,779	0,7	0,75	0,743
6	2	15,00000	20,00000	0,153	0,18	0,15	0,161
7	3	20,00000	20,00000	0,359	0,42	0,35	0,376333
8	3	10,00000	40,00000	0,202	0,25	0,21	0,220667
9	3	15,00000	30,00000	0,214	0,22	0,24	0,224667

Для експериментальних значень функції відгуку необхідно здійснити оцінку точності вимірювань і перевірити однорідність дисперсій. Оскільки кількість паралельних випробувань в усіх рядках матриці є однаковою, однорідність дисперсій оцінювали за критерієм Кохрена, що розраховується за таким співвідношенням

$$G = \frac{S_{y_{\max}}^2}{\sum_{i=1}^N S_{y_i}^2}, \quad (3.1)$$

де $S_{y_{\max}}^2$ – найбільша вибіркова дисперсія;

$\sum_{i=1}^N S_{y_i}^2$ – сума вибіркових дисперсій;

N – кількість рядків у матриці експерименту (кількість проведених дослідів).

Вимірювання вважаються рівноточними, а дисперсії – однорідними, якщо

$$G < G_{\text{табл}}, \quad (3.2)$$

де $G_{\text{табл}}$ – табличне значення для критерію Кохрена.

Висновки щодо рівноточності вимірювань здійснюються за допомогою критерію Кохрена. На вибраному рівні значущості значення цього критерію,

обчислені на основі експериментальних даних функцій відгуку, не перевищують допустимих меж. Це свідчить про те, що всі вимірювання, проведені в рамках експерименту, є рівноточними, а гіпотеза про однорідність дисперсій для всіх функцій відгуку є прийнятною.

При оцінці значущості коефіцієнтів регресії в отриманому рівнянні визначається табличне значення критерію Стюдента, яке порівнюється з розрахунковим згідно з даними (див. рисунок 3.1).

Фактор	Ефект	Ст. Ош.	t(З)	p	-95, % Дов. Пред	+95, % Дов. Пред	Коеф.	Ст. Ош. Коеф.	-95, % Дов. Пред	+95, % Дов. Пред
Сред/Ср. член	0,347222	0,019257	18,03114	0,000372	0,285938	0,409506	0,347222	0,019257	0,285938	0,409506
(1)t, кв.(L)	0,407222	0,047169	8,63319	0,003269	0,257108	0,557336	0,203611	0,023585	0,128564	0,278668
t, кв.(K)	-0,097500	0,040850	-2,38679	0,097022	-0,227502	0,032502	-0,048750	0,020425	-0,113751	0,016251
(2)f, кгц(L)	0,251889	0,047169	5,34010	0,012839	0,101775	0,402003	0,125944	0,023585	0,050887	0,201001
f, кгц(K)	-0,005167	0,040850	-0,12648	0,907353	-0,135169	0,124836	-0,002583	0,020425	-0,067585	0,062418
П. на 2L	0,138833	0,057770	2,40319	0,095600	-0,045018	0,322685	0,069417	0,028885	-0,022509	0,161342

Рисунок 3.1 – Перевірка за критерію Стюдента

У ході статистичного аналізу було отримано експериментальні залежності (3.3, 3.4), а також побудовано графіки відповідних функцій (рисунки 3.2, 3.3). Рівняння, яке використовується для обчислення маси пошкоджених ПВ з урахуванням парних лінійних і квадратичних взаємодій, записується у наступному вигляді

$$y = 0,347 + 0,204x_1 + 0,126x_2 - 0,048x_1^2 + 0,07x_1x_2 \quad (3.3)$$

або

$$m = 0,347 + 0,204t + 0,126f - 0,048t_1^2 + 0,07tf. \quad (3.4)$$

Обчислимо теоретичні значення параметру оптимізації y , й величину помилки $\Delta y = \bar{y} - y$.

Таблиця 3.3 – Параметри оптимізування та величина помилки.

план	Наблюдає	Предск.	Остатки
1	0,461000	0,409889	0,051111
2	0,630667	0,579889	0,050778
3	0,131667	0,121306	0,010361
4	0,176000	0,172667	0,003333
5	0,743000	0,780417	-0,037417
6	0,161000	0,158000	0,003000
7	0,376333	0,389694	-0,013361
8	0,220667	0,234361	-0,013694
9	0,224667	0,278778	-0,054111

За результатом таблиці 3.3 будемо графік досто вірності результатів.

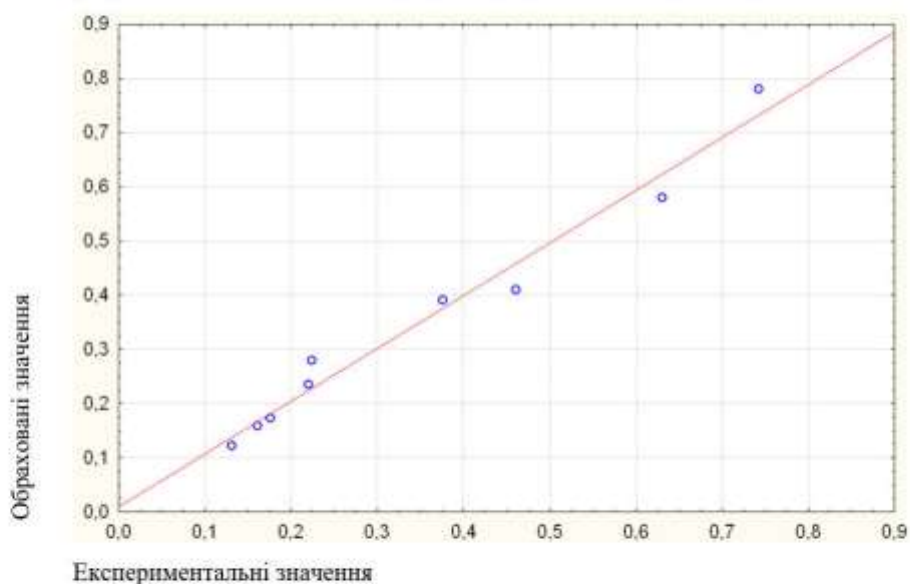


Рисунок 3.4 – Адекватність отриманих рівняння й експериментальних досліджень

Розрахуєм дисперсію адекватності:

$$S_{ад}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (\bar{y} - y)^2}{f} = \frac{\sum_{i=1}^N \Delta y_i^2}{f}, \quad (3.5)$$

де $f = N - (k + 1)$ – число ступенів свободи.

$$S_{\text{до}}^2 = \frac{0,088}{9 - (3 + 1)} = 0,022$$

Адекватність мат. моделі визначається по критерію Фішера:

$$F_{\text{розрах.}} = \frac{S_{\text{до}}^2}{S_{\{y\}}^2} = \frac{0,022}{0,1306} = 0,168$$

$$F_{\text{табл.}} = 19,04$$

$F_{\text{розрах.}} < F_{\text{табл.}}$, тому модель адекватна.

3.3 Методика розрахунків основних параметрів ультразвукової обробки

Для оцінювання впливу ультразвуку на процес очищення нафтових труб від асфальтено-смоляних (АС) і парафінових (П) відкладень необхідно використовувати комплексний підхід, який враховує взаємодію кавітуючого поля та теплового ефекту від ультразвукових хвиль. Наявні дослідження свідчать про ефективність цього методу, однак механізм дії ультразвукових хвиль лишається недостатньо вивченим. Наразі неможливо з високою точністю описати, як саме впливають ультразвукові коливання на процес плавлення і видалення АС та П відкладень. У подальшому буде представлена математична модель, що пояснює одну з гіпотез цього феномену.

Експериментальні дані вказують на те, що відкладення зазнають одночасної дії двох основних чинників: теплового ефекту, спричиненого акустичною енергією ультразвуку, та механічного впливу хвильових коливань. Поширення тепла у подібних середовищах добре вивчено завдяки застосуванню класичних рівнянь теплопровідності. Для подальшого аналізу приймається сферична модель розповсюдження теплових і ультразвукових хвиль.

Розглянемо процес поширення тепла у сферичних координатах

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{\lambda}{\rho c_v} \left[\frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right], \quad (3.6)$$

де T – температура ПВ відкладень у досліджуваному об'ємі;

r – координата у сферичних координатах;

ρ – щільність ПВ відкладень;

λ – коефіцієнт теплопровідності.

Припускаючи, що збільшення температури відбувається за рахунок потужності теплового випромінювання в ультразвуковому випромінювачі, то правомірно додати граничну умову

$$\frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_0} = \frac{Q}{\lambda F}, \quad (3.7)$$

де Q – потужність джерела тепла;

F – площа поверхні (теплового джерела);

r_0 – умовний габаритний теплового джерела.

Механізм впливу ультразвуку на температурні властивості асфальтосмолистих і парафінових відкладень все ще залишається невизначеним. Передбачається, що природа цього впливу тісно пов'язана з інтенсивністю ультразвукових хвиль. У випадку ідеалізованого середовища без поглинання гармонійна симетрична сферична хвиля може бути описана рівнянням

$$u(r,t) = \frac{A}{r} \cdot e^{-i\omega t \pm kr}, \quad (3.8)$$

де A – амплітуда для ультразвукових коливань.

Зменшення інтенсивності ультразвукових коливань вносить у рівняння додатковий сталий множник, нормований до одиничної довжини шляху.

Таким чином, для плоскої хвилі, що поширюється вздовж осі x , можна представити наступну залежність

$$I = I_0 \cdot e^{-ax} e^{-i\omega(t - \frac{x}{c})}, \quad (3.9)$$

де a – коефіцієнт загасання ультразвукових хвиль.

Тоді інтенсивність (її величина) ультразвукових хвиль зі урахуванням зменшення можна визначити так

$$I = \frac{A_1}{r} \cdot e^{-ar}, \quad (3.10)$$

A_1 – це коефіцієнт, який відображає фізичні властивості середовища, у якому поширюються ультразвукові хвилі, а також параметри самих хвиль, що визначають їх поведінку та вплив у даному середовищі.

Якщо виходити з припущення, що дія ультразвукових хвиль у заданій точці простору залежить від інтенсивності коливань, і при цьому ця залежність є прямопропорційною, то можна сформулювати відповідне математичне рівняння, яке пов'язує ці величини

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \chi \frac{1}{r} \cdot e^{-ar} \quad (3.11)$$

де χ – коефіцієнт, що враховує не лише фізичні властивості середовища, але й особливості параметрів хвилі, включаючи вплив теплових факторів.

Важливо зазначити, що в загальному випадку значення коефіцієнта χ може значно змінюватися залежно від характеристик акустичного середовища, властивостей відкладень, а також амплітудно-частотних характеристик джерела ультразвуку. Таким чином, цей коефіцієнт є багатофакторним показником, який вимагає ретельного врахування для кожної конкретної ситуації.

Отже, зміна температури у певному об'ємі середовища з урахуванням ПВ у загальному вигляді описується функціональною залежністю, що враховує вищевказані фактори

$$\frac{\partial T}{\partial t} = f\left(\frac{\lambda}{\rho c_v} \left[\frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right], \chi \frac{1}{r} \cdot e^{-\alpha r} \right). \quad (3.13)$$

З метою точнішого математичного моделювання цієї залежності пропонується застосувати регресійний аналіз. Це дозволяє виконати розкладання залежності в поліном, що в свою чергу дає змогу отримати більш деталізований та адаптований до реальних умов опис

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial t} &= f\left(\frac{\lambda}{\rho c_v} \left[\frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right], \chi \frac{1}{r} \cdot e^{-\alpha r} \right) \approx \\ &\approx C_1 \cdot \frac{\lambda}{\rho c_v} \left[\frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right] + C_2 \cdot \chi \frac{1}{r} \cdot e^{-\alpha r} + C_3 \cdot \chi \frac{1}{r} \cdot e^{-\alpha r} \cdot \frac{\lambda}{\rho c_v} \left[\frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right]. \end{aligned} \quad (3.14)$$

Щоб забезпечити відповідність фізичним принципам, додається умова: за відсутності ультразвукового впливу (тобто коли $\chi = 0$), рівняння повинно зводитися до класичного рівняння теплопровідності. Це дозволяє зберегти адекватність моделі в тих випадках, коли зовнішній акустичний вплив відсутній і температурні процеси відбуваються виключно за рахунок теплопередачі у середовищі

$$\left. \frac{\partial T}{\partial t} \right|_{\chi=0} = C_1 \cdot \frac{\lambda}{\rho c_v} \left[\frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right] = \frac{\lambda}{\rho c_v} \left[\frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right]. \quad (3.15)$$

Таким чином, $C_1 = 1$.

Перейдімо до визначення числа C_2 . Розглянемо ситуацію, коли присутній ультразвуковий вплив, проте тепловий ефект відсутній. Відомо, що самі ультразвукові хвилі не виступають джерелом теплового впливу. Це означає, що зміни температури не повинні спостерігатися.

$$\left. \frac{\partial T}{\partial t} \right|_{Q=0} = C_2 \cdot \chi \frac{1}{r} \cdot e^{-\alpha r} = 0. \quad (3.16)$$

Отже, $C_2 = 0$. Тоді

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial t} &= \frac{\lambda}{\rho c_v} \left[\frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right] + C_3 \cdot \chi \frac{1}{r} \cdot e^{-ar} \cdot \frac{\lambda}{\rho c_v} \left[\frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right] = \\ &= \left(1 + C_3 \cdot \chi \frac{1}{r} \cdot e^{-ar} \right) \frac{\lambda}{\rho c_v} \left[\frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right], \end{aligned} \quad (3.17)$$

Проведемо заміну $C_3 \cdot \lambda = \chi_0$.

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial t} &= \left(1 + \chi_0 \frac{1}{r} \cdot e^{-ar} \right) \frac{\lambda}{\rho c_v} \left[\frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right] \\ \frac{\partial T}{\partial t} &= \left(1 + \chi_0 \frac{1}{r} \cdot e^{-ar} \right) \frac{\lambda}{\rho c_v} \left(\frac{2}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right). \end{aligned} \quad (3.18)$$

Отримано рівняння, яке використовують для моделювання ультразвукового впливу на ПВ. Враховуючи спрощення, що ігнорує вплив конвекції та дифузії, можна визначити час, необхідний для підвищення температури від T_1 до T_2 , який відповідає процесу нагрівання

$$t = \frac{\rho V [c(T_2 - T_1) + \lambda_n]}{\eta Q} \quad (3.19)$$

V – приблизний об'єм ПВ;

T_1 – початкова температура °C;

T_2 – кінцева температура °C;

ρ – щільність ПВ, кг/м³;

c – теплоємність ПВ, Вт / К · м³;

Q – потужність, що споживається ультразвуковою установкою, кВт;

η – коефіцієнт корисної дії (ультразвукового випромінювача);

λ_n – теплота плавлення ПВ, кДж / кг.

Тоді як час ультразвукового впливу можливо виразити таким математичним рівнянням (3.4) (нехтуючи квадратичною взаємодією часу)

$$t = \frac{m_1 - 0,347 - 0,126f}{0,204} = 4,9m_1 - 1,7 - 0,62f, \quad (3.20)$$

$$4,9m_1 - 1,7 - 0,62f = \frac{m(c(T_2 - T_1) + \lambda_n)}{\eta Q}, \quad (3.21)$$

$$m(c\Delta T + \lambda_n) = \eta Q(4,9m_1 - 1,7 - 0,62f), \quad (3.22)$$

$$mc\Delta T = \eta Q(4,9m_1 - 1,7 - 0,62f) - m\lambda_n, \quad (3.23)$$

$$\begin{aligned} \Delta T &= \frac{\eta Q(4,9m_1 - 1,7 - 0,62f)}{mc} - \frac{m\lambda_n}{mc} = \frac{4,9\eta Qm_1}{mc} - \frac{1,7\eta Q}{mc} - \frac{0,62\eta Qf}{mc} - \frac{\lambda_n}{c} = \\ &= \frac{4,9\eta Q}{c} - \frac{1,7\eta Q}{V \cdot \rho \cdot c} - \frac{0,62\eta Qf}{V \cdot \rho \cdot c} - \frac{\lambda_n}{c} = \frac{4,9\eta Q - \lambda_n}{c} - \frac{1,7\eta Q + 0,62\eta Qf}{V \cdot \rho \cdot c}. \end{aligned} \quad (3.24)$$

Отже, прогнозована різниця температур, при якій відбудеться видалення ПВ, становить

$$\Delta T = \frac{4,9\eta Q - \lambda_n}{c} - \frac{1,7\eta Q + 0,62\eta Qf}{V \cdot \rho \cdot c}. \quad (3.25)$$

Висновки до розділу 3

Розроблені рівняння, що моделюють кількість ПВ, які можуть від'єднатися залежно від тривалості та частоти ультразвукової взаємодії, дозволяють точно прогнозувати необхідний час для очищення поверхні труби від ПВ. Надійність отриманих результатів підтверджується коефіцієнтом детермінації $R=0,975$. Аналіз побудованих графіків та вивчених залежностей демонструє, що вирішальним фактором, який впливає на масу від'єднаних ПВ, є тривалість ультразвукової взаємодії. Це обґрунтовується тим, що у рівнянні (3.4) найбільше значення має додатній коефіцієнт саме при цьому параметрі. Таким чином, максимального значення результуючої функції (100%) можна досягти за умов $t=22$ хвилини та $f=42$ кГц.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Дослідження механізму впливу ультразвуку на поверхню твердих тіл, а також успішне його застосування у процесах обробки свердловин, свідчать про перспективність використання ультразвукових методів для боротьби з парафіновими відкладеннями (ПВ).

Експериментальні дослідження були проведені відповідно до методології планування експерименту, що дозволило зменшити кількість необхідних дослідів до дев'яти (з триразовим повторенням кожного експериментального пункту), не знижуючи при цьому достовірності отриманих результатів і адекватності встановлених залежностей. Дослідження базувалося на двофакторному експерименті з варіюванням двох параметрів на трьох рівнях: тривалість ультразвукової обробки становила 10, 15 і 20 хвилин, а частоти ультразвукових хвиль були визначені як 20, 30 і 40 кГц.

У результаті було отримано математичну модель, що дозволяє оцінювати кількість парафінових відкладень, які можуть бути видалені з поверхні, залежно від тривалості та частоти впливу ультразвуку. Ця модель дає змогу прогнозувати оптимальний час, необхідний для усунення відкладень із внутрішньої поверхні труб. Коефіцієнт кореляції результатів складає $R=0.975$. Аналізуючи графічні залежності та отримані результати, встановлено, що найбільший вплив на масу видалених ПВ має тривалість ультразвукового впливу. Це підтверджується тим, що в рівнянні поверхні відгуку коефіцієнт при цьому параметрі має максимальне значення та є додатнім. Максимальне значення цільової функції (100%) досягається за умов тривалості обробки $t = 22$ хвилини та частоти $f = 42$ кГц.

Запропонований алгоритм визначення оптимальних параметрів роботи ультразвукової обробки може слугувати основою для вибору режимів експлуатації ультразвукового обладнання, яке застосовується в умовах конкретного родовища.

Список використаних літературних джерел

1. Копей Б.В. Механічні методи зняття відкладень парафіну та асфальтосмолистих речовин з поверхні свердловинного обладнання / Копей Б.В., Кузьмін О.О., Копей В.Б. // Нафтогазова енергетика. № 3(8), 2008, с.10-14.
2. Копей В.Б. Підвищення ресурсу штангової колони при видобутку парафінистих нафт: дис. ... канд. техн. наук : 05.05.12 / Копей Володимир Богданович. – Івано-Франківськ, 2004. – 167 с.
3. Онищук С.Ю. Сучасні методи профілактики відкладень парафіну на глибинному обладнанні свердловинної штангової насосної установки / С.Ю. Онищук // VI міжн. конф. Молодих науковців “Інформатика та механіка”, м. Кам’янець-Подільський, 6-8 трав. 2008 р. : тези доп. – м. Кам’янець-Подільський, 2008. – С. 53-54.
4. Середюк, В. Д. Запобігання відкладанню асфальтеносмолопарафінових відкладів у стовбурі свердловини / В. Д. Середюк, Л. О. Книш // Нафтогазова енергетика. - 2010. - № 1. - С. 37-40.
5. Branco V.A.M. Asphaltene flocculation and collapse from petroleum fluids, *Journal of Petroleum Science and Engineering* / Branco V.A.M., Mansoori G.A., Xavier L.C.A., Park S.J., Manafi H // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2001. – V. 32. – P. 217–230.
6. Teixeira M. A. Use of thermogravimetry for classification of chemical nature of deposits of petroleum industry / Teixeira M.A., Goncalves M.L.A. // *Petroleum Science and Technology*. – 1999. – V. 17. – № 1–2. – P. 1–13.
7. Wu, T. *Theory and Fundamentals of Ultrasound* / T. Wu, N. Guo, C. The, J. Hay // *Advances in Ultrasound Technology for Environmental Remediation*. – Springer, Dordrecht, 2013.
8. Xiao, G. High Frequency Vibration Recovery Enhancement Technology in the Heavy Oil Fields of China / G. Xiao // *SPE International Thermal Operations and Heavy Oil Symposium and Western Regional Meeting*. – Bakersfield, 2004.