

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ІВАНО-ФРАНКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ НАФТИ І ГАЗУ**

**ЯКИМЕЧКО Я. Я., ЗАЙЦЕВ О. М., ЧУДИК І. І.,
ФЕМ'ЯК Я. М., ФЕДИК О. М.**

УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИДОБУВАННЯ ВИСОКОВ'ЯЗКИХ НАФТ СТРУМИННИМИ НАСОСАМИ З ВИКОРИСТАННЯМ КАВІТАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ



**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ІВАНО-ФРАНКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ НАФТИ І ГАЗУ**

**ЯКИМЕЧКО Ярослав Яремович
ЗАЙЦЕВ Олег Миколайович
ЧУДИК Ігор Іванович
ФЕМ'ЯК Ярослав Михайлович
ФЕДИК Остап Михайлович**

Наукове видання

**УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ
ВИДОБУВАННЯ ВИСОКОВ'ЯЗКИХ
НАФТ СТРУМИННИМИ
НАСОСАМИ З ВИКОРИСТАННЯМ
КАВІТАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ**

Монографія

Друкується в авторській редакції

Монографія розрахована на науковців, викладачів і фахівців нафтогазового профілю та здобувачів другого й третього рівнів вищої освіти, які навчаються за освітніми програмами спеціальності 185 «Нафтогазова інженерія та технології».

Дрогобич
Посвіт
2022

УДК 622.24.051

У 31....

Рекомендовано до друку:

Вченою радою Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу (протокол № 06/624 від 27 травня 2021 року).

Рецензенти:

Судаков А.К. – д-р техн. наук, проф. кафедри нафтогазової інженерії і буріння Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»;

Дреус А. Ю. – д-р техн. наук, завідувач кафедри аерогідромеханіки та енергомасопереносу Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара;

Кондрат О. Р. – д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри видобування нафти і газу Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу.

У 31...Якимечко Я. Я., Зайцев О. М., Чудик І І., Фем'як Я. М., Федик О. М.

Удосконалення технології видобування високов'язких нафт струминними насосами з використанням кавітаційних процесів Монографія. – Дрогобич: «Посвіт», 2022. – 140 с.

ISBN 978-617-8003-70-8

Проведено теоретичні дослідження пульсаційно-хвильових явищ, зокрема кавітації, яку штучно створюють в потоці робочої рідини при проходженні нею через гідродинамічний кавітатор.

Експериментально визначено характер пульсацій потоку робочої рідини. Встановлено, що виникнення кавітації на виході з гідродинамічного кавітатора спричиняє руйнування просторової структури високов'язкої нафти, розривання її полімолекулярних ланцюгів і призводить до зниження її в'язкості.

Удосконалено технологію видобування високов'язких нафт струминними насосами з розділеними робочими потоками з використанням енергії, що створюються кавітаційними коливаннями.

Монографія розрахована на науковців, викладачів і фахівців нафтогазового профілю та здобувачів другого й третього рівнів вищої освіти, які навчаються за освітніми програмами спеціальності 185 «Нафтогазова інженерія та технології».

УДК 622.24.051

© Якимечко Я. Я., Зайцев О. М., Чудик І І.,
Фем'як Я. М., Федик О. М., 2022.

© Посвіт. 2022

ISBN 978-617-8003-70-8

Зміст

ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1 Аналіз стану інтенсифікації видобування висов'язких нафт	8
1.1 Запаси важких вуглеводнів та способи їх розробки.	8
1.2 Основні технологічні проблеми, які виникають при експлуатації свердловин з високов'язкими нафтами	10
1.3 Струминні насоси для видобування пластових рідин	11
1.4 Вплив імпульсно-хвильових коливань, які створюються різноманітними пристроями, на інтенсифікацію видобування нафти	15
1.5 Характеристика кавітаційно-хвильових процесів, які створюються пульсуючими пристроями	29
РОЗДІЛ 2 Теоретичні дослідження закрученого потоку робочої рідини під час проходження її через гідродинамічний кавітатор	41
2.1 Теоретичні дослідження руху вихрового ядра в закрученому потоці робочої рідини з центральною областю зниженого тиску. . .	41
2.2 Виникнення явища нутації вихрового ядра в закрученому потоці робочої рідини і сили, які сприяють її виникненню	52
2.3 Критерії стійкості закрученого потоку робочої рідини при наявності прецесуючого вихрового ядра	59
2.4 Вплив ступеня кручення на стійкість структури закрученого потоку	69
2.5 Термодинамічний аналіз процесу кавітації в закрученому потоці . .	73
РОЗДІЛ 3 Експериментальні дослідження пульсаційно-кавітаційних процесів, що виникають в процесі роботи гідродинамічного пульсатора (кавітатора)	77
3.1 Схема і принцип дії гідродинамічного кавітатора для створення синергічного впливу на високов'язкі вуглеводні	77
3.2 Проектування стенду для проведення досліджень з виявлення впливу фізичних полів, створюваних гідродинамічним кавітатором на зниження в'язкості важких нафт	79
3.3 Проведення випробувань на лабораторному стенді та аналіз отриманих результатів	83

3.4	Удосконалення конструкції гідродинамічного кавітатора за результатами досліджень	86
3.5	Проведення стендових випробувань гідродинамічного кавітатора удосконаленої конструкції	88
3.6	Аналіз результатів дослідження	98
РОЗДІЛ 4 Удосконалення технології видобування високов'язких нафт струминними насосами з використанням енергії пульсуючих потоків		105
4.1	Склад комплекту обладнання для видобування високов'язких нафт	105
4.2	Методика визначення технологічних параметрів роботи свердловинної установки	108
4.3	Визначення витрат робочої рідини і подачі струминного апарату ..	109
4.4	Підготовка робочої рідини на поверхні в процесі роботи струминного апарату	114
4.5	Технологічна схема обв'язки обладнання для видобування нафти за допомогою струминного насоса з розділеними робочими	117
4.6	Промислові випробування комплекту обладнання для видобування високов'язких нафт	119
	Список літератури	129

ВСТУП

Проблема пошуку ефективних технологій видобування високов'язкої нафти із свердловин сьогодні є актуальною у всіх нафтовидобувних країнах світу, у тому числі і в Україні.

На сьогоднішній день в Україні відкрито низку родовищ високов'язких нафт, серед яких найбільш відомі Коханівське, Бугруватівське, Яблунівське, Чечвинське, Семенівське, Акташське, Борзівське та інші. Глибини залягання пластів з високов'язкою нафтою на цих родовищах коливаються від 200-300 м до 3000-4000 м. 75 % високов'язких нафт знаходяться на глибинах до 2000 м. В пластових умовах в'язкість цих нафт складає від 20 мПа·с до 100 мПа·с і більше. На сьогоднішній день на більшості родовищ горизонти високов'язкої нафти експлуатуються неефективно через відсутність відповідного до умов залягання глибинно-насосного обладнання. На свердловинах, які експлуатуються насосним способом, їх дебіти складають 1-7 м³/добу. В цілому лише по двох родовищах таких нафт (Бугруватівському та Коханівському) пробурено та підготовлено до експлуатації близько сотні свердловин.

Основні ускладнення під час експлуатації горизонтів з високов'язкими нафтами (ВВН) пов'язані з фізико-хімічними властивостями самих нафт. Збільшення їх в'язкості і зниження температури при підніманні на поверхню та значний вміст асфальтеносмолопарафінових речовин призводить до відчутних втрат тиску у привибійній зоні пласта, стовбурі свердловини, інтенсивного відкладання густих вуглеводнів на стінках насосно-компресорних труб і, як наслідок, погіршення видобувних можливостей свердловин і збільшення загальних витрат на експлуатацію таких свердловин. Усунення цих недоліків дало б змогу збільшити видобуток високов'язкої нафти на родовищах України. Для цього необхідно вирішити низку задач, які до сьогоднішнього дня практично не вирішені.

Однією із таких задач є удосконалення технології видобування та високоефективного насосного обладнання для піднімання високов'язкої нафти із

свердловин, вирішення якої є досить актуальним на сучасному етапі нафтовилучення. Сьогодні у всіх країнах світу ведеться інтенсивний пошук нових технологій і технічних засобів, які базуються на нових фізичних явищах і ефектах.

До таких фізичних явищ відноситься і кавітація. Використання кавітаційно-пульсаційної технології для зниження в'язкості важких нафт в свердловинних умовах на родовищах з високов'язкими вуглеводнями може забезпечити істотне збільшення дебіту свердловин та зниження витрат на їх експлуатацію. Тому проблема більш ефективної експлуатації свердловин, що продукують високов'язкі нафти, за умов існування дефіциту енергоносіїв є актуальною і потребує подальшого вивчення.

В монографії розглянуто актуальну науково-практичну задачу, зумовлену удосконаленням технології видобування високов'язких нафт струминними насосами шляхом монтування в конструкцію насоса гідродинамічного кавітатора, який буде створювати у свердловині штучну кавітацію, тобто пульсуючі потоки певної амплітуди і частоти; проведено дослідження роботи гідродинамічного кавітатора: вплив витрат робочої рідини на ступінь її кручення і виникнення кавітації, визначенням величини частоти і амплітуди кавітаційно-пульсаційних коливань та їх вплив на зниження в'язкості високов'язкої нафти у свердловинних умовах і збільшення швидкості її піднімання із свердловин глибиною до 2000 м.

Слід зазначити наступне:

- теоретичні дослідження базуються на обґрунтуванні динаміки пульсуючих потоків робочої рідини, а саме: встановленні впливу витрати рідини на ступінь її кручення в гідродинамічному кавітаторі та визначенні впливу ступеня кручення робочої рідини на процес виникнення кавітаційних явищ.

- експериментальні частина включає у себе лабораторні стендові дослідження впливу частоти і амплітуди коливань, які створюються гідродинамічним кавітатором, на зміну в'язкості нафти, що видобувається зі свердловин глибиною до 2000 м та оцінку динаміки зміни в'язкості нафти при її обробці гідродинамічним кавітатором;

- промислові приймальні випробування експериментального взірця

комплекту обладнання з використанням впливу енергії пульсуючих потоків проводились з метою визначення збільшення дебіту високов'язких нафт.

В ході проведення досліджень розроблено стандарт підприємства «Технологія видобування високов'язких нафт за допомогою вставного струминного апарату з розділеними робочими потоками», який затверджено ВАТ «Укрнафта». Стандарт введено в дію вперше.

На думку авторів, наведені в монографії матеріали можуть знайти успішне відображення в навчально-методичному забезпеченні освітнього процесу Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу при виконанні курсових і магістерських робіт студентами, що навчаються за освітньо-професійною програмою «Видобування нафти і газу» першого та другого рівнів вищої освіти за спеціальністю № 185 «Нафтогазова інженерія та технології», а також можуть бути корисними для здобувачів третього рівня вищої освіти, що навчаються за освітньо-науковою програмою доктора філософії за спеціальністю «Нафтогазова інженерія та технології».

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СТАНУ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ВИДОБУВАННЯ ВИСОВ'ЯЗКИХ НАФТ

1.1 Запаси важких вуглеводнів та способи їх розробки

Незначний до недавнього часу видобуток важких вуглеводнів в різних країнах пояснюється не стільки більш низькими цінами, скільки технічними і технологічними складностями їх видобування і транспортування, наявністю на світовому ринку достатньої кількості легкої нафти. Але у зв'язку з виснаженням багатьох родовищ нафти і збільшенням цін на неї, яке за прогнозами буде продовжуватися, а також відкриттям значних запасів важких вуглеводнів у ряді країн, зростає зацікавленість до їх видобутку. Загальновізнано, що важкі нафти і бітуми будуть одним із важливих джерел вуглеводнів у 21 столітті [1]. В деяких країнах вони вже зараз набувають важливого значення. Здійснюються інтенсивні роботи з удосконалення процесів видобування важких вуглеводнів і створенню нової техніки і технологій.

Величезні запаси важких вуглеводнів є в багатьох регіонах світу. Крупні і дуже крупні родовища є в Канаді, Венесуелі, США, Росії, на Середньому Сході, в Європі, Африці і Азії. Світові запаси важких нафт оцінюються в 700–750 млрд. м³, що приблизно у сім разів перевищує залишкові видобувні запаси звичайних нафт [2].

На сьогоднішній день в Україні відкрита значна кількість родовищ високов'язких нафт, серед яких найбільш відомі Коханівське, Бугруватівське, Яблунівське, Чечвинське, Семенівське, Акташське, Борзівське та інші, розвідані балансові запаси яких становлять близько 94,438 млн. тонн [3]. Глибини залягання пластів з високов'язкою нафтою на цих родовищах коливаються від 1000 до 3600 м. та інші, розвідані балансові запаси яких становлять близько 94,438 млн. тонн. Близько 75% в'язких нафт знаходяться на глибинах до 2000 м. В'язкість нафти, піднятої з свердловин, знаходиться в межах від 1000 мПа·с до 3000 мПа·с, хоча в пластових умовах в'язкість цих нафт складає від 20 мПа·с до 100 мПа·с і більше. На сьогоднішній день на більшості родовищ горизонти

високов'язкої нафти експлуатуються неефективно через відсутність відповідного до умов залягання глибинно-насосного обладнання. На свердловинах, які експлуатуються насосним способом, їх дебіти складають 1-5 м³/добу. В цілому лише по двох родовищах таких нафт (Бугруватівському та Коханівському) пробурено та підготовлено до експлуатації близько сотні свердловин. Тому проблема більш ефективної експлуатації свердловин, що продукують високов'язкі нафти, за умов існування дефіциту енергоносіїв є актуальною [4].

Найбільш широке застосування отримали свердловинні методи розробки важких вуглеводнів. В першу чергу це відноситься до родовищ важких нафт, але застосовуються вони і на деяких родовищах бітумів, які залягають на порівняно великих глибинах, недоступних для кар'єрної розробки.

При будь-якому методі свердловинної розробки важких вуглеводнів при зниженні їх температури під час підняття на поверхню і транспортуванні виникають суттєві ускладнення внаслідок збільшення в'язкості.

Вибір засобів розробки таких родовищ визначається фізико-хімічними властивостями вуглеводнів (в першу чергу їх в'язкістю); умовами залягання і характером продуктивних пластів (їх глибиною і товщиною); величиною заданого кінцевого коефіцієнта видобування із пластів; економічними показниками видобування вуглеводнів.

З чотирьох можливих способів розробки родовищ застосовуються лише три: свердловинний, кар'єрний, шахтно-свердловинний. Майже 95% світового видобутку припадає на свердловинний метод розробки і лише 5% на кар'єрний.

З свердловинних методів знаходять застосування два: розробка в режимі виснаження природної енергії – природний режим (ПР) та паротеплової дії. На перший метод приходить біля 85% видобутку нафти, на другий – 15%. Вклад методу внутрішньопластового горіння (ВГ) у світовому об'ємі видобутку складає менше 0,5%. В колишньому СРСР накопичено деякий досвід свердловинної розробки родовищ високов'язких нафт тепловими методами на рівні дослідно-проектних робіт, але цей досвід дуже поступається зарубіжному.

В США з 46 млн. тонн річного видобутку високов'язких нафт і природних

бітумів майже дві третини (28,5 млн. тонн) видобувають на природному режимі, решта 17,5 млн. тонн – тепловими методами. Видобуток за рахунок нагнітання пари складає 16,9 млн. тонн. На метод внутрішньо-пластового горіння приходить всього 0,6 млн. тонн. Використовується площадне нагнітання пари (ПНП) та циклічне нагнітання пари (ЦНП).

1.2 Основні технологічні проблеми, які виникають при експлуатації свердловин з високов'язкими нафтами

В Україні видобування високов'язкої нафти здійснюється свердловинним методом з використанням глибинно-насосних установок, а в якості глибинних насосів використовують штангові, електрозанурювані, гідропоршневі і гвинтові.

Враховуючи те, що в міру піднімання нафти з вибою свердловин її в'язкість суттєво зростає, застосування штангових насосів стає не лише нерентабельним, але й технічно важко реалізованим. Зокрема, експлуатація штанговими глибинонасосними установками характеризується зависанням штангової колони при ході вниз, великим розтягуючим напруженням - при ході вверху, відбувається неузгодженість роботи верстата-гойдалки і колони штанг, розривами канатної підвіски або колони штанг. При відкачуванні рідини з в'язкістю понад $20\text{-}50\cdot 10^{-4}$ м²/с нормальна експлуатація насосної установки буде неможливою, якщо не застосовувати спеціальних заходів [5-7].

В електрозанурюваних насосах (ЕЗН) в зв'язку з ростом в'язкості нафти, різко зростає необхідний напір насоса, росте напрута на електропроводах ЕЗН, що призводить до виведення їх з робочого стану.

З відомих типів насосів для піднімання високов'язких нафт залишаються гвинтові та гідропоршневі. В цих типах насосів проблеми напору не мають вирішального значення, позаяк робочою рідиною виступає легка нафта, розчинник або спеціальні види емульсій, які при змішуванні з високов'язкими нафтами не приводять до ще більшого росту в'язкості змішаного потоку. В обох видах насосів відношення витрат робочої рідини до витрат високов'язкої нафти, яка поступає до всмоктуючої камери насосів, складає від 5-10 до 1. Таким чином, ріст в'язкості змішаного потоку у ліфтовій частині труб не перевищує 15-20 %, а

відповідно і необхідний напір насосів по відношенню до їх напору при роботі з чистою робочою рідиною не перевищує 20-25%. Єдиною проблемою для обох видів насосів є проблема всмоктування високов'язких нафт. Якщо в'язкість цих нафт не перевищує 10-30 мПа·с, то приймати спеціальні заходи до її зменшення не має потреби. У випадку більшої в'язкості ніж 30 мПа·с в умовах вибою виникає потреба розробки спеціальних технічних рішень, які б дозволяли зменшувати в'язкість.

Серйозним недоліком гвинтових насосів є ненадійність гумової обойми робочих органів, потреба у потужних електродвигунах і необхідність глибших занурень під динамічний рівень (більших глибин спуску насосів) [8,9].

Технічні характеристики гідропоршневих насосів мають суттєві обмеження за максимально можливими витратами. Так, при глибині свердловини 3000 м українські насоси виробництва Сумського науково-виробничого об'єднання можуть піднімати на поверхню нафту з витратою 15 м³/добу. Тобто вони можуть бути використані лише в малодібінних свердловинах.

В США струминні насоси були розроблені в 70-х роках минулого століття і почата експериментальна експлуатація нафтових свердловин фірмами Kobe, National і Guiberson. Застосування їх на деяких свердловинах виявилось досить ефективним.

1.3 Струминні насоси для видобування пластових рідин

Струминні насоси в даний час широко застосовують в багатьох країнах світу, в тому числі і в Україні. Вперше в Україні запропонував використання струминних апаратів в технології освоєння свердловин та інтенсифікації припливу вуглеводнів професор Яремійчук Р.С. за участю інженерів Кіфора Б.І., Лотовського В.М., Шандровського Т.Р., доцента Возного В.Р. та ін.

Струминні насоси, які можна застосовувати при підніманні звичайної легкої і високов'язкої важкої нафти, мають дуже гнучку характеристику. В цих насосах відсутні рухомі деталі, тому вони відрізняються досить великою надійністю, мають значний моторесурс (6000 годин), у вставному варіанті можуть бути замінені без підйому насосно-компресорних труб.

В авторському свідоцтві № 1332018 СРСР, МКИ F 04 F 5/54 авторами Р.С. Яремійчуком, Б.М. Кіфором, В.М. Лотовським та ін. описується свердловинна насосна установка, яка використовується при нафтогазовидобуванні. Вихід відноситься до струминної техніки. На рисунку 1.1 представлено схематичне зображення свердловинної насосної установки.

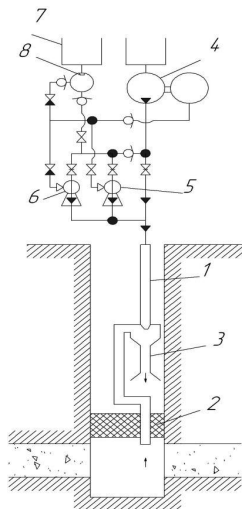


Рисунок 1.1 – Свердловинна насосна установка:

- 1 – колона НКТ; 2 – пакер; 3 – струминний насос; 4 – наземний насос;
 5, 6 – рідинно-газові ежектори; 7 – сміть для поверхнево-активної речовини;
 8 – дозатор

Запуск установки в роботу здійснюється подачею робочої рідини від наземного насоса 4 через насосно-компресорні труби 1 до струминного насоса 3 внаслідок чого відбувається відкачування рідини з підпакерної зони на поверхню.

При подачі робочої рідини від наземного насоса 4 до першого 5 і другого 6 рідинно-газовим ежекторам в насосно-компресорні труби 1 надходить газорідинна суміш, причому в міру її просування до робочого сопла струминного насоса 3 газ розчиняється в рідині і потрапляє в робоче сопло струминного насоса у вигляді рідини.

Відома також свердловинна насосна установка для відкачування рідини із

свердловин, до складу якої входить струминний насос. Її авторами є Яремійчук Р.С., Белей І.В., Лопатін Ю.С. та інші. Технологічна схема обв'язки свердловинної насосної установки зображена на рис. 1.2.

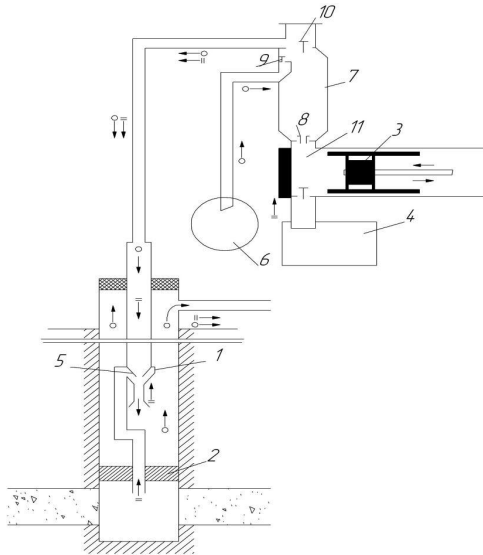


Рисунок 1.2 – Технологічна схема обв'язки свердловинної насосної:

1 – струминний насос; 2 – пакер; 3 – наземний насосний агрегат; 4 – ємність з робочою рідиною; 5 – активне сопло струминного насосу; 6 – ємність з газом; 7 – компресорна камера; 8 – калібрований дозатор; 9 – всмоктувальний клапан; 10 – нагнітальний клапан; 11 – робоча камера поршневого наземного насосного агрегату

Під час роботи установки в установленій у свердловині з пакером 2 струминний насос 1 наземним насосним агрегатом 3 через компресійну камеру 7 подають рідину і газ, які відбираються з ємностей 4 і 6. При цьому необхідний газоміст суміші (у межах до 95 %) встановлюється за допомогою каліброваного дозатора (8), який регулює співвідношення потрапляючих в робочу камеру 11 насосного агрегату 3 рідини через всмоктуючий клапан 9 під час ходу поршня агрегату (3) при всмоктуванні. Суміш, яка потрапила в робочу камеру 11 під час

ходу поршня агрегата 3, подається в активне сопло 5 струминного насоса 1 і, витікаючи з нього, захоплює пластову рідину з підпакерної зони і разом з нею по кільцевому каналу свердловини виноситься на поверхню. В кільцевому просторі за рахунок аерації нафти і використанні енергії газу, який виділяється із суміші, суттєво знижує тиск на пласт, що дозволяє збільшити приплив і відбір нафти або пластової рідини. Але все вище перераховане відноситься тільки до легких нафт із невеликим вмістом парафіну.

Застосування глибинних струминних насосів для експлуатації нафтових свердловин зумовлено такими їх особливостями:

- необхідний тиск робочої рідини біля входу у сопло струминного насосу створюється не тільки наземним силовим насосом, але і напором стовпа робочої рідини в міжтрубному просторі або колоні НКТ;

- тиск на виході струминного насоса, який необхідний для підйому рідини на поверхню, суттєво зменшується завдяки газліфтному ефекту, який виникає при виділенні вільного газу з нафти в колоні НКТ;

- менша чутливість до наявності вільного газу і піску в рідині у порівнянні з поршневыми насосами;

- простота конструкції і порівняно малі габарити насосів, надійність і корозійна стійкість при прийнятній ціні [10, 11].

Струминні насоси залишаються роботоздатними при надвисокій в'язкості продукції, вмісті у ній будь-якої кількості вільного газу, при значному вмісті механічних домішок і при підвищенні температури навколишнього середовища [8].

Поєднання струминного насоса із дією на високов'язку нафту імпульсно-кавітаційними технологіями може істотно вплинути на інтенсифікацію видобування важких вуглеводнів із свердловин. Удосконалення технології і модернізація струминних апаратів для видобування високов'язких нафт є на даний час актуальними і перспективними в контексті збільшення дебітів свердловин вуглеводневих енергоносіїв.

1.4 Вплив імпульсно-хвильових коливань, які створюються різноманітними пристроями, на інтенсифікацію видобування нафти

Для інтенсифікації видобутку нафти використовують різні методи впливу на пласт. До них відносяться теплові, хімічні і фізичні. Кожний з них має свої переваги і недоліки [12].

Для підвищення видобутку високов'язких і високопарафіністих нафт ефективно використовують теплову дію, але цей метод потребує великої кількості теплової енергії та тривалого часу обробки пласта через його низьку теплопровідність.

Хімічна дія на пласт виявляється нерентабельною через високі ціни на хімікати та шкідливого їх впливу на навколишнє середовище.

Теплову та хімічну дію на пласт можна значною мірою замінити акустичною, яку можна локалізувати в обмеженому об'ємі, підбираючи як потужність, так і частоту дії, а також комбінацію різних частот.

Сургучовим М.Л., Кузнецовим О.Л., Сімкіним Е.М. виконано лабораторні та промислові дослідження для встановлення дії акустичних коливань та гідродинамічних імпульсних дій на привибійну зону з метою інтенсифікації видобутку нафти та попередження відкладання парафіну [13]. Ці дослідження показали наступне:

а) важко досягти достатньої для ефективно дії на пласт інтенсивності магніто-стрикційних та електромагнітних випромінювачів через великі витрати енергії в довгих кабелях та технічні труднощі у виготовленні потужних генераторів, що можуть спускатися в зону пласта на існуючій в даний час елементній базі;

б) швидке руйнування і ненадійність в роботі акустичних сирен при великих зовнішніх тисках;

в) недовговічність і ненадійність роботи імпульсних електророзрядних генераторів;

г) неможливість створення кавітації і тим самим ефективно дії акустичного поля на привибійну зону при великих пластових тисках існуючими

випромінювачами.

Ці недоліки частково можна обійти, використовуючи струминні генератори акустичного поля.

Для збудження коливань в рідині в цих пристроях частина кінетичної енергії струменю перетворюється в енергію коливань.

За принципом збудження коливань рухомих струменем вони поділяються на:

- а) стержневі (пластинчасті);
- б) роторні (клапанні);
- в) вихрові (струминні) [14 - 17].

Гідродинамічні випромінювачі служать для перетворення кінетичної енергії струменю в енергію пружних коливань. Генерація виникає внаслідок турбулентності струменю. Для розрахунку акустичного поля використовують теорію акустичної аналогії Лайтхилла, згідно з якою турбулентний потік розглядають як задане джерело звуку певної структури [18].

Нестаціонарний потік в обмеженій області створює звукове поле, яке поза течією описується неоднорідним хвильовим рівнянням:

$$\left(\frac{1}{C_0^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \nabla^2 \right) h = q \quad (1.1)$$

де C - швидкість звуку;

h - змінна, зв'язана із збуренням тиску;

∇ - втрати тиску на тертя;

q - інтенсивність джерела, яка визначається структурою і масштабами турбулентності, а також формою джерела.

Аналіз величин у виразі для дальнього поля від миттєвих турбулентних джерел дозволяє оцінити потужність Na акустичної хвилі некорельованими вихорами з об'ємом l^3 , що поширюється в просторі об'ємом V

$$Na \sim (\rho_0 v^3 l^2) \left(\frac{V}{l^3} \right) M^5 \quad (1.2)$$

Вираз (1.2) можна зобразити у вигляді трьох членів, з яких перший

$(\rho v^2)l^3(v/l)$ показує швидкість підводу енергії до вихору з масштабом l , необхідну для підтримання його руху з швидкістю v , другий член v/l^3 - число вихорів в об'ємі, а третій M^5 - ефективність джерел при малих числах Маха. Приведений вираз еквівалентний напівімперичному закону $Na \sim v^8$, де v - швидкість витікання струменю. Приведені вирази дають лише якісну оцінку випромінювання звуку струминною течією, постільки практично одержаний інтегральний ефект створюється в основному від низькочастотних компонентів турбулентного спектра, а звідси, не можна описати потужність випромінювання від турбулентності одиничного об'єму. Тому в розробці гідродинамічних генераторів використовують емпіричний підхід.

Стержневі випромінювачі

До даної групи відносяться випромінювачі, в яких збудження коливань резонуючих елементів у вигляді пластин, стержнів або мембран викликається набігаючим струменем рідини [19]. В свою чергу коливання резонансних елементів створюють акустичне поле в рідині.

Найбільш простим і поширеним є пластинчатий випромінювач з консольним або двоточковим кріпленням пластин (рис. 1.3).

Струмінь, що витікає з великою швидкістю з конусно-циклічного або щілинного сопла, потрапляє на вістря пластини, де проходить зрив струменю і де виникають вихрові пульсації. При співпаданні частоти пульсацій струменю з власною резонансною частотою пластини, від неї в рідину відходять акустичні хвилі.

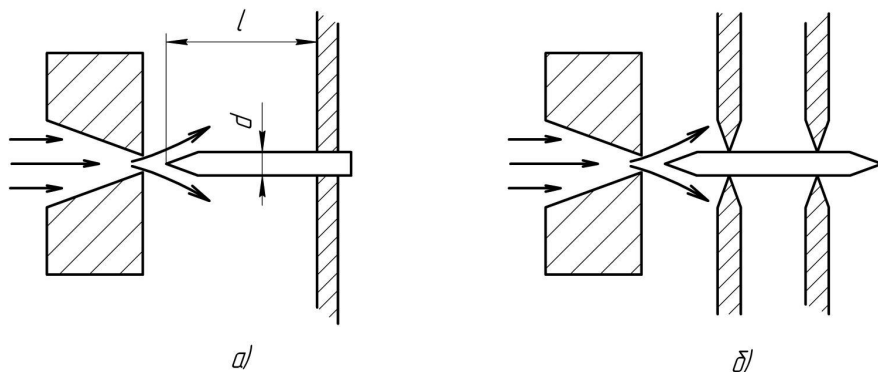


Рисунок 1.3 – Пластинчатий випромінювач:

а) консольне кріплення пластин; б) двоточкове кріплення пластин

Орієнтовно оцінка параметрів таких випромінювачів може бути здійснена за формулами, де частота власних коливань струменю визначається як

$$f = \frac{n\nu}{2L}, \quad (1.3)$$

де $n - 1, 2, 3 \dots$;

ν - швидкість струменю, м/с;

L - віддаль від сопла до відбивача (пластини), м.

Основну частоту коливання пластини, закріпленої консольно, можна знайти за формулою

$$f = 0,163 \frac{d}{l^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (1.4)$$

де d - товщина пластини, м;

l - довжина пластини, м;

E - модуль Юнга, Н/м²;

ρ - густина матеріалу пластини, кг/м³.

При кріпленні пластини у двох вузлових точках віддаль між вузлами приймається рівною $0,55l$, де l - довжина всієї пластини. Основну частоту її коливання визначають за формулою:

$$f = 10^4 \frac{x^2}{2\pi} (1-\gamma)^2 \frac{\tau}{\left(\frac{l}{2}\right)^2} \left(\frac{E}{3\rho}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (1.5)$$

де x - безрозмірний коефіцієнт;

$$\gamma = \frac{2a}{l-2a};$$

a - довжина заточки, м;

τ - час тривалості процесу, с.

Більшу інтенсивність акустичного поля можна одержати за допомогою багатостержневого випромінювача (рис. 1.4).

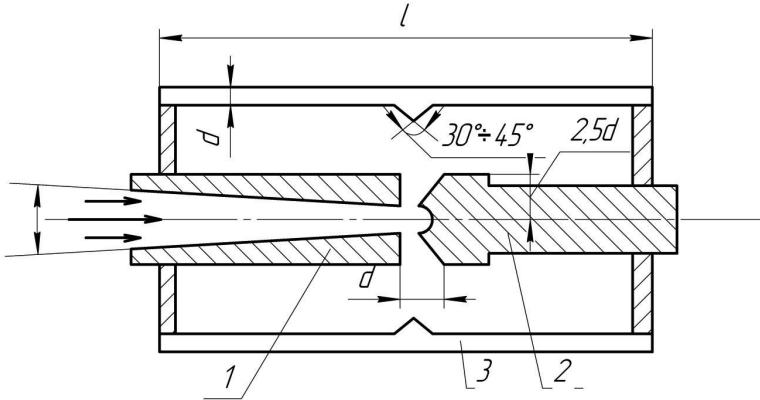


Рисунок 1.4 – Багатостержневий випромінювач:
1 – сопло; 2 – відбивач струменю; 3 – стержні

Частота власних коливань стержнів, що закріплені з двох сторін, дорівнює

$$f = 1,03 \frac{d}{l^2} \left(\frac{E}{\rho}\right) \quad (1.6)$$

Недоліком генераторів з резонансними пластинами (стержнями) є швидкий вихід з ладу резонуючих елементів в результаті дії динамічних навантажень, близьких до границі міцності металу, та кавітаційної ерозії і вістря пластини.

Роторні випромінювачі

Роторні випромінювачі засновані на принципі почергового закривання і відкривання проходу для струменю, внаслідок чого виникає циклічне підвищення

і пониження тиску в рідині, що сприяє створенню акустичного поля.

Роторний випромінювач складається з ротора і статора, кожен з яких може складатися з одного або декількох каоксіально розташованих циліндрів з прорізами або отворами. При обертанні ротора відбувається почергове співпадання або неспівпадання прорізів ротора і статора, внаслідок чого в оточуючій рідині виникають пульсації тиску. Найбільше поширення дістали роторні випромінювачі, в статорі і роторі яких прорізи мають прямокутну форму. Частота пульсацій залежить від числа прорізів N і числа обертів ротора n

$$f = Nn \quad (1.7)$$

При роботі роторного випромінювача в середині ротора значно понижується тиск, що можна використати для створення замкнутих потоків з метою багаторазової обробки рідкої фази.

Крім роторних випромінювачів з приводом ротора ззовні, відомий генератор, приводом якого є потік рідини (рис. 1.5).

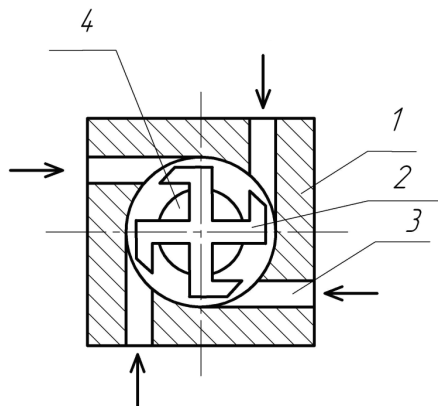


Рисунок 1.5 – Генератор:

1 – статор; 2 – ротор; 3 – вхідний тангенціальний канал; 4 – вихідний отвір

При подачі струменю через вхідні тангенціальні канали, ротор приходить в обертання і перекриває канали, перед каналами тиск зростає, а на вихідному отворі падає, але ротор, повертаючись, по інерції відкриває вхідні канали, тиск перед ними падає і зростає на вихідному отворі. Таким чином, в потоці рідини

створюються коливання, частота яких залежить від швидкості обертання та кількості вхідних каналів.

Недоліком роторних генераторів є швидка кавітаційна ерозія країв вхідних отворів на статорі та поверхні ротора, тому що в цих місцях виникає інтенсивна кавітація. Ці генератори не використовувати там, де необхідно одержувати велику інтенсивність акустичного поля на протязі тривалого часу, наприклад, при видобутку нафти.

Вихрові генератори

Принципом дії вихрових генераторів ґрунтується на зміні напрямку потоку або на взаємодії двох струменів між собою. Одну з таких конструкцій зображено на рис. 1.6. Генерація коливань визначається нестійкістю обертового струменю, а також при зриві обертового потоку із зрізу вихідного конусу. Струмінь рідини входить через тангенціальний отвір і здійснює обертовий рух в камері завихрення, виходячи з неї і через звужений вихідний отвір збільшує обертовий рух і зривається з гострих кромek вихідного отвору. При цьому виникають пульсації вихідного потоку. Для їх підсилення через центральний отвір подається струмінь, величину якого можна регулювати. Недоліком такого генератора є низький коефіцієнт корисної дії і зрив генерації при збільшенні різниці тисків на вході та виході більше, ніж $5 \cdot 10^5$ Па.

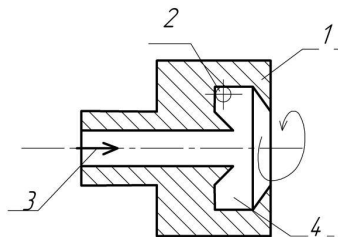


Рисунок 1.6 – Вихровий генератор:

- 1 – корпус; 2 – вхідний тангенціальний отвір;
- 3 – додатковий центральний вхід; 4 – камера завихрення

Гідродинамічний випромінювач

Гідродинамічний випромінювач генерує коливання в рідині за рахунок кінетичної енергії струменю (рис. 1.7). Для цього вхідна течія ділиться на дві

частини, які, повертаючись в циліндричних камерах, взаємодіють з основною течією до її розділу, внаслідок чого виникають коливання тиску у вихідному струмені, при цьому генерується широкий спектр частот.

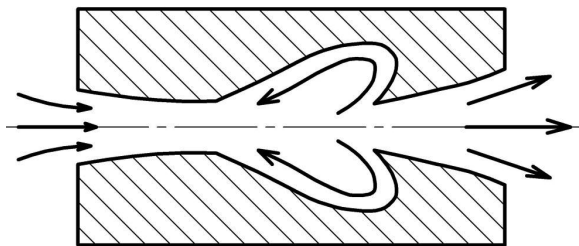


Рисунок 1.1 – Гідродинамічний випромінювач

Низькочастотну складову можна визначити за формулою

$$f = \frac{v}{2\pi R} \quad \text{або} \quad f = \frac{Q}{2\pi R S} \quad (1.8)$$

де v - швидкість струменю на вході в циліндричні камери, м/с;

R - радіус камер, м;

Q - витрата рідини, м³/с;

S - площа поперечного перерізу струменю на вході в циліндричні камери, м².

Акустичні коливання викликають в насиченому пористому середовищі пульсуючі потоки, так званий звуковий вітер, відомий також сейсмoeлектричний ефект в насиченому пористому середовищі, зв'язаний з виникненням електричного потенціалу при поширенні в ньому пружної хвилі. В останній час виявлені термодинамічні ефекти, що виникають в пористому середовищі при дії на нього ультразвуком, до яких відносяться:

а) термоакустичний ефект, що виражається у зміні ефективної теплопровідності середовища в акустичному полі;

б) явище зміну тиску насичення, а також зміщення точки конденсації вуглеводневих систем в пористому середовищі під дією акустичного поля;

в) руйнування гідратних газів під дією тепла і ультразвуку.

Ці та інші ефекти при дії акустичних коливань на високов'язку нафту

можуть бути використані з метою інтенсифікації видобування нафти. Вони є ефективними лише тоді, коли інтенсивність коливань достатня і основним в цьому є розробка, випробування і впровадження потужних і довговічних генераторів акустичного імпульсного поля, тому перспективними в цьому напрямі є гідродинамічні випромінювачі.

Ефективність цих методів часто залежить від комплексу одночасної дії не одного, а декількох факторів, які кожний зокрема не дають бажаного ефекту. Тому ефективність акустичних коливань стає високою при одночасному температурному впливі і циклічній зміні тиску. Відомо, що дія ультразвуку призводить до зменшення в'язкості нафти. Цей ефект посилюється в міру інтенсивності ультразвуку і часу озвучення нафти, тобто залежить від фізичної дози ультразвуку. Фізичну дозу ультразвуку можна виразити такою з

$$D = \frac{IS\tau}{V}, \quad (1.9)$$

де I - інтенсивність ультразвуку, Вт·сек/м;

S - площа, яка озвучується, м²;

τ - час опромінення, с;

V - об'єм опроміненої нафти, м³.

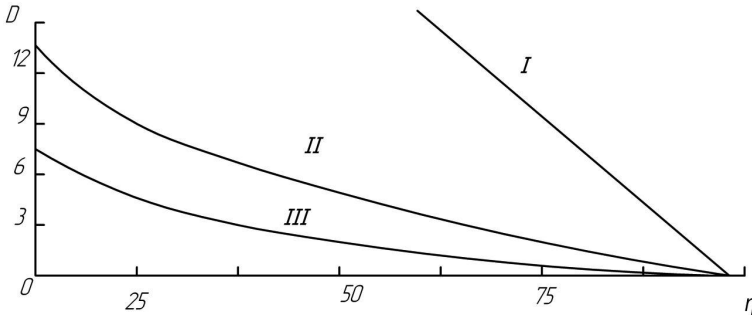


Рисунок 1.8 – Залежність в'язкості нафти від дози ультразвуку

На рис. 1.8 наведені експериментальні криві для трьох різних взірців нафти. На осі ординат нанесені значення фізичної дози у Вт·сек/м, а на осі абсцис – значення в'язкості нафти в умовних одиницях (при шкалі приладу в 100 одиниць).

Найбільш різке зниження в'язкості при озвученні ультразвуком спостерігається в нафті III, яка вміщує максимальну кількість смоли і парафіну. Значно менше змінюється в'язкість нафти I, яка вміщує 0,1 % парафіну і 6% смоли. Таким чином, склад нафти є основним показником, від якого залежить зниження в'язкості під дією ультразвуку, що є причиною зменшення в'язкості нафти в ультразвуковому полі.

Як показують дослідження [13], нафта, особливо парафіниста, сильно поглинає ультразвук. В результаті цього нафта нагрівається, що, в свою чергу, призводить до зменшення її в'язкості. На користь термічної дії ультразвуку на зниження в'язкості нафти говорить той факт, що через 5-6 годин після озвучення в'язкість нафти знову збільшується.

Однак, із рис. 1.8 і 1.9 видно, що температурні зміни в'язкості і зміни в'язкості під дією ультразвуку неоднакові. Це дає основу для висновку про те, що на зменшення в'язкості впливає не тільки температура, але й інші фактори.

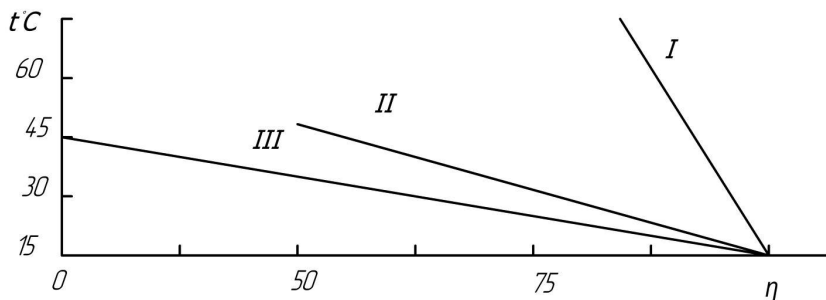


Рисунок 1.9 – Залежність в'язкості нафти від температури

Високов'язка нафта не володіє в'язкістю, яка підпорядковується законам Ньютона, Пуазейля, Стокса, позаяк довгі неупорядковано розміщені молекули парафіну і смоли утворюють деяку гнучку решітку, в якій розміщується розчин. Тому система проявляє значний опір силам зсуву. Ультразвук розриває безперервний ланцюжок, руйнуючи зв'язки між окремими частинками молекул. Зв'язки ці порівняно слабкі, тому необхідний незначний вплив ультразвукових хвиль. Після зупинки опромінення молекули парафіну і смоли повільно

відновлюють початкову систему, завдяки неупорядкованому броунівському руху, тобто під дією ультразвуку відбувається руйнування структурної решітки, причому ця решітка відновлюється після зупинення дії ультразвуку протягом певного часу [18]. Таким чином, ультразвук впливає на зміну структурної в'язкості, тобто на тимчасовий розрив ван-дер-ваальсових зв'язків.

Аналіз досліджень показує, що під дією ультразвуку великої інтенсивності на протязі довгого часу озвучення порушуються С-С зв'язки в молекулах парафіну, внаслідок чого відбувається зміна фізико-хімічного складу (зменшення молекулярної ваги, температури кристалізації та інше).

Опромінення нафти ультразвуком різної частоти при постійній дозі дає залежність, яка зображена на рис. 1.10.

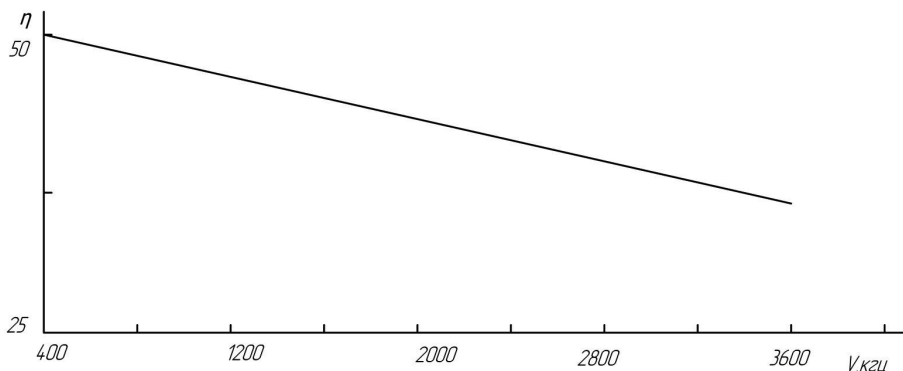


Рисунок 1.10 – Залежність в'язкості нафти від частоти ультразвуку ($D - \text{const}$).

В одному із патентів США [19] розглянутий спосіб і пристрій акустичного стимулювання свердловини, де в обсадну колону вводять звуковий генератор гвинтового типу і вільно підвішують його в зоні пласта. До генератора подають вниз по обсадній колоні рідину для генерації енергії звукових коливань, внаслідок чого в зоні генератора створюється гідростатичний напір. Регулюють швидкість подачі рідини в генератор для одержання коливань з наперед заданою частотою, а також підтримання гідростатичного напору в області генератора з метою передачі звукової енергії високого рівня від генератора в пласт через рідину. Продовжують вводити рідину в генератор, поки пласт не стане проникливим про

що буде свідчити значне зменшення гідростатичного напору.

Для зменшення в'язкості нафти застосовують вихрові акустичні випромінювачі [20]. Вихровий акустичний випромінювач складається з циліндричної камери з симетрично розміщеними тангенціальними отворами для подачі рідини. При проходженні потоку в камеру через тангенціальні отвори випромінювача утворюється вихровий потік акустичних коливань. Одним із видів акустичних випромінювачів (рис. 1.11) є камера, в якій розміщений ротор 1 з лопатями 2 за числом тангенціальних отворів 3, причому простір між лопатями 4 має в поперечному січенні ротора кругову форму.

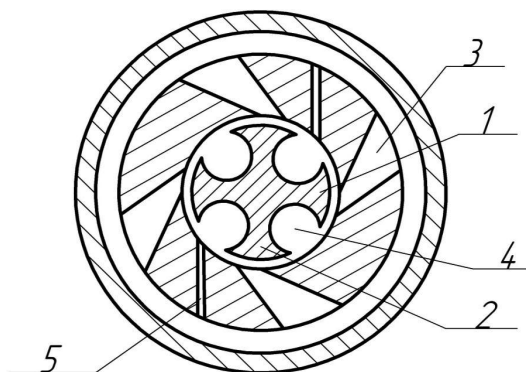


Рисунок 1.11 – Випромінювач акустичний

Додаткові тангенціальні отвори 5 служать для запуску випромінювача. При подачі рідини через тангенціальні отвори 3 ротор починає крутитися. Крім руху робочої рідини з частотою руху ротора відбувається утворення вихорів в міжлопатевих просторах ротора, які мають кругову форму. Ці вихори взаємодіють один з одним на виході випромінювача, в результаті чого утворюється додаткова компонента коливань.

Існують вихрові генератори з використанням вихрового потоку [21]. Вихрові генератори мають дві вихрові камери з гострими кромками. Для можливості регулювання потужності випромінювання при постійній частоті коливань застосовують генератор [22] (рис. 1.12), який укомплектований

пластиною, що має форму каналу, і камерами в повздовжньому січенні. Пластина встановлена в корпусі з можливістю переміщення в поперечному напрямленні відносно осі.

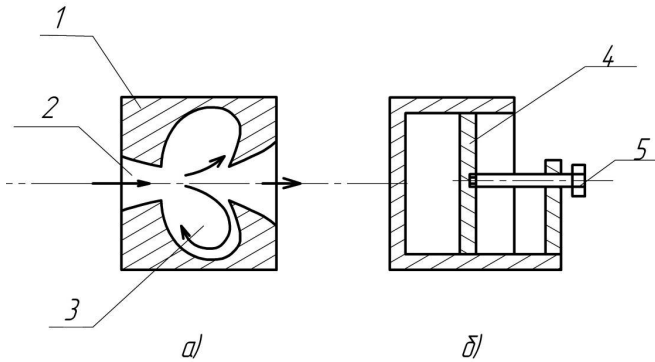


Рисунок 1.12 – Вихровий генератор:

a – генератор в повздовжньому розрізі; б – генератор в поперечному розрізі

Вихровий генератор складається з корпусу 1 з центральним каналом 2 і двох вихрових циліндричних камер 3, які утворюють з профілем каналу гострі і тупі кромки. В середині корпусу 1 розміщена пластина 4, яка рухається за допомогою гвинта 5.

Потік робочої рідини входить в канал 2, частина потоку захоплюється гострими кромками і попадає у вихрові циліндричні камери 3, де ця частина потоку обертаючись, викликає коливання основного потоку, який проходить через канал 2. В результаті цього на виході каналу 2 виникають коливання звукової частоти.

Частота коливань залежить від діаметру вихрових циліндричних камер і швидкості потоку, а потужність визначається витратою рідини через наскрізний канал. Змінюючи величину прохідного січення шляхом переміщення пластини 4 паралельно самій собі, можна регулювати потужність генератора без зміни частоти коливань.

Таке виконання генератора дозволяє, не перериваючи технологічного процесу, проводити високоякісну обробку рідини, незалежно від величини напору

струменю.

Розглянемо ультразвуковий гідродинамічний випромінювач [23] (рис. 1.13), який складається з корпусу 1, в якому розміщена основна вихрова камера 3.

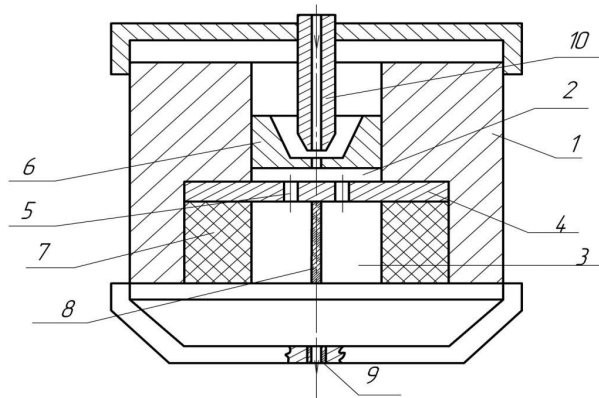


Рисунок 1.13 – Гідродинамічний випромінювач

Ці дві камери розділені перегородкою 4 з отворами 5. У верхній частині вихрової камери розміщений вкладиш 6. В середині магнітної камери розміщений магніт 7 з феромагнітним стержнем 8. В нижній частині корпусу знаходиться сопло 9, а у верхній частині – ежектор 10.

Робоча рідина поступає під тиском в ежектор 10, де ежекується. У вихровій камері 2 проходить ультразвукова обробка потоку, який рухаючись через перегородку 4 з отворами 5 в магнітну камеру 3 попадає під магнітні силові лінії і кільцевого магніту 7. Оброблена рідина виходить через сопло 9.

Для зменшення в'язкості високов'язких нафт застосовують різного виду свердловинні гідралічні вібратори. Один із таких вібраторів [24] встановлюється в середній частині інтервалу перфорації. При закачуванні рідини в насосно-компресорні труби муфта з кулею переміщається вниз вздовж вікон, стискаючи пружину. В момент відкриття вікон корпусу на вибої свердловини створюється різке збільшення тиску – відбувається гідралічний удар на привибійну зону. Після вирівнювання тисків під дією пружини муфта з кулею переміщується вгору і вікна корпусу закриваються.

1.5 Характеристика кавітаційно-хвильових процесів, які створюються пульсуючими пристроями

В пульсаторах при визначених умовах при русі робочої рідини можуть виникати кавітаційні процеси. В рідині і на поверхні твердого тіла у випадку, якщо тиск підтримується нижче деякого критичного тиску, що визначається фізичними властивостями і станом рідини, виникають бульбашки пари або парогазових сумішей, які лускають, попавши в зону з підвищеним тиском.

Результати експериментальних і теоретичних досліджень з кавітації викладені в роботах М.І.Гуревича [25,26], А.Д.Перника [27], Л.А.Епштейна [28], В.М.Івченко [29], Г.В.Логвіновича [30], Г.Біркгоффа і Е.Сарантонелло [31, 32], В.В.Рожественского [33], Р.Кнеппа [34], Дж.Дейлі, Ф.Хемміта, Е.Джонсона [35].

Кавітація полягає в утворенні розривів суцільності на деяких ділянках потоку рухомої крапельної рідини. Розриви виникають в тих ділянках рухомого потоку, де в результаті перерозподілу тиску, зумовленого рухом рідини, відбувається значне місцеве зниження тиску.

Явище кавітації характеризується виникненням в нерозривному рідинному середовищі дрібних парогазових бульбашок, об'єм яких швидко зростає в міру збільшення швидкості потоку руху рідини і відповідного зниження тиску.

За характером потоку рідини і походженням розрізняють: гідродинамічну кавітацію, яка має місце в потоці рідини при обтіканні нерухомої перепони (стороннього тіла); вібраційну (ультразвукову) кавітацію, яка виникає в результаті збудження інтенсивних коливань в рідині; вихрову, яка виникає внаслідок інтенсивного завихрення рідини [36]. В першому і другому випадках в місцях розрідження, під якими розуміють негативні тиски, проходить розрив суцільності рухомої рідини з утворенням порожнин у вигляді бульбашок або каверн, які заповнені газом або парами оточуючої рідини. При переході бульбашок (каверн) в зону позитивного тиску вони лускають і створюють мікрогідравлічні удари в оточуюче середовище. В цьому полягає одна з версій руйнівної дії кавітації на тверді поверхні, які знаходяться поблизу.

Релей [37] вираховував швидкість скорочення кавітаційної бульбашки

$$v = \sqrt{\frac{2}{3} \cdot \frac{P_0}{\rho} \cdot \left[\left(\frac{r_0}{r} \right)^3 - 1 \right]}, \quad (1.10)$$

де P_0 - гідростатичний тиск, Па;

ρ - густина рідини, кг/м³;

r_0 - початковий (максимальний) радіус бульбашки, м;

r - радіус бульбашки у фіксований момент, м.

Дана формула була отримана при наступних припущеннях: рідина – не стискується, її в'язкість можна знехтувати, в рідині відсутні розчинені гази.

Розрахунки при таких ідеальних умовах показують, що поблизу лускаючої бульбашки в рідині можуть виникати тиски, які дорівнюють сотні МПа [38].

За Релеєм час повного лускання кавітаційної бульбашки можна визначити з рівняння

$$t_d = 0.915 \cdot r_0 \cdot \sqrt{\frac{\rho}{P}}, \quad (1.11)$$

де r_0 - максимальний радіус кавітаційної бульбашки, м;

P - гідростатичний тиск стовпа рідини, Па.

Для реальних умов бульбашки, яка заповнена газом, можна розрахувати максимальну температуру (T_{max}) і максимальний тиск (P_{max}) [16], які відповідно виникають в момент її лускання:

$$T_{max} = T_0 \cdot \left[\frac{P_m \cdot (\gamma - 1)}{P} \right], \quad (1.12)$$

$$P_{max} = P \cdot \left[\frac{P_m \cdot (\gamma - 1)}{P} \right], \quad (1.13)$$

де T_0 - температура середовища, °С;

γ - співвідношення питомих теплоємностей газової (або парогазової) суміші;

P - тиск у кавітаційній бульбашці при її максимальному розмірі (звичайно припускають, що він дорівнює тиску насиченої пари рідини), Па. Зокрема, для

бульбашки, що містить азот ($\gamma = 1,33$), у воді при 293 К значення T_{\max} і P_{\max} складають відповідно 4200 К і 9,75 МПа.

Сьогодні нема єдиної класифікації і термінології з кавітаційних явищ які виникають у різних пристроях. Це пов'язано з тим, що ступінь розвитку кавітації є відносно загальним поняттям. Через це бажано використовувати класифікацію кавітаційних потоків, запропоновану в роботі [27], за якою гідродинамічна кавітація поділяється на рухому, приєднану і вихрову.

До рухомої відносять кавітацію, при якій в рідині виникають окремі нестационарні каверни і бульбашки, що рухаються разом з нею, після чого лускають при входженні в зону підвищеного тиску. Такі нестационарні каверни виникають як на стінці, так і в об'ємі рідини в рухомих вихорах і при високому рівні турбулентності.

Зокрема, приєднаною кавітацією називається кавітація з відривом потоку рідини від твердої границі обтікаючого тіла або стінки каналу з утворенням порожнини або каверни на твердій границі. На відміну від рухомої таку кавітацію називають також поверхневою, маючи на увазі розміщення кавітаційних порожнин відносно стінки, вздовж якої рухається потік рідини [39]. Нерухома (осіла або приєднана) порожнина є стійкою тільки в квазістационарному розумінні. Її межа має інколи вигляд поверхні інтенсивної киплячої турбулізованої рідини. В інших випадках поверхня розмежування між рідиною і великою порожниною може бути гладкою і прозорою (режим струминного обтікання). В рідині біля поверхні приєднаної бульбашки достатньо великих розмірів спостерігається велика кількість дрібних рухомих нестационарних бульбашок. Ці дрібні бульбашки швидко ростуть до максимальних розмірів на початку кавітаційної зони і не змінюються до моменту свого лускання.

Інколи спостерігаються коливання, при яких приєднана кавітаційна бульбашка спочатку росте, після чого лускає за рахунок захоплення її рідиною і наступного заповнення бульбашки з кінця зони кавітації. Максимальна довжина приєднаної порожнини залежить від сили тиску. Кавітаційна порожнина може закінчуватися в точці приєднання основного потоку рідини до поверхні тіла на

деякій відстані від передньої кромки порожнини – часткова кавітаційна порожнина, яка може простягатися далеко за межі обтікаючого рідиною тіла. В останньому випадку кавітацію називають суперкавітацією, а кавітаційну порожнину – суперпорожниною. Принципова відмінність суперкавітаційного потоку полягає в тому, що його характеристики залишаються стабільними, але втрати енергії при цьому збільшуються.

Багаточисленні експериментальні дані вказують на те, що при наявності газу збільшується тиск початку кавітації, полегшуючи момент її виникнення і прискорюючи її розвиток. Наприклад, деякі експерименти [40] щодо впливу загального вмісту повітря в рідині на виникнення і розвиток кавітації в трубі Вентурі показали наступне. Підвищення вмісту повітря не тільки прискорює виникнення кавітації, але й приводить до якісних змін її розвитку. Якщо в експериментах із звичайною водопровідною водою кавітація з'являється у вигляді кільцеподібної кавітаційної зони, що поширюється в міру розвитку вздовж і в середину (до осі) потоку руху рідини, то при підвищеному вміщенні повітря у воді кавітаційна зона виникала в середині потоку, в районі максимальних швидкостей, і збільшувалась в об'ємі, наближаючись в міру розвитку до стінки, вздовж якої рухається потік рідини.

Розмірковуючи про вплив газу на виникнення і розвиток кавітації, слід розрізняти розчинений і вільний газ. Зародження газової фази в рідинах являє собою процес, зв'язаний зі значними перетвореннями у властивостях і структурі будови газорідних систем, а також з багаточисленними відхиленнями від стабільних умов виділення газу, які супроводжують зниження тиску в суміші поблизу тиску насичення її газом, інтенсивність яких особливо велика з урахуванням метастабільного стану газорідних розчинів. При цьому міцність рідини і результати формування газової фази в газорідних системах виступають функцією багатьох факторів, пов'язаних як зі складом і фізико-хімічними властивостями сумішей, так і з термобаричними показниками і динамікою зниження тиску в середовищі.

На виникнення і розвиток кавітації суттєво впливає вільний газ, який

присутній у рідині у вигляді нерозчинних бульбашок. По цій причині фактична міцність реальних багатокомпонентних газорідних систем в деяких випадках є на декілька порядків нижчою за розрахункові значення реально-міцнісних характеристик рідин.

За даними досліджень [41] в результаті лускання кавітаційних бульбашок з'являється можливість утворення потужних мікропотоків, подібних до кумулятивних струменів. Виникнення мікроструменів в результаті лускання кавітаційних бульбашок викликається відхиленням поверхні бульбашки від сферичної форми. Зародження кавітаційних бульбашок проходить не окремо, а у взаємодії з іншими бульбашками на малих відстанях. В деяких випадках, коли стінки бульбашок розташовані близько одна до одної, а також внаслідок наявності високих градієнтів тиску, відбувається загальне спотворення форми бульбашок і їх сплющування. В потужних ультразвукових полях вихровий рух рідини створює розтягуючі напруження, які сприяють викривленню поверхні бульбашки, утворенню заглиблень і западин.

На кінцевому етапі лускання кавітаційної бульбашки рідина потрапляє у вигляді мікроструменів в заглиблення і пронизує бульбашку з великою швидкістю (від сотні до декількох тисяч м/с). Ударна дія мікроструменів приводить до руйнування поверхні тіл які знаходяться на даний момент в зоні лускання кавітаційних бульбашок.

Це підтверджується і роботою Плессета і Чапмена [42], які досліджували вплив стійкості кавітаційної бульбашки поблизу твердої стінки. Розв'язок рівняння потенційного руху ідеальної нестискуваної рідини показав, що відбувається спотворення сферичної форми бульбашки, при лусканні якої утворюється струмінь рідини, направлений у бік твердої стінки (рис. 1.14).

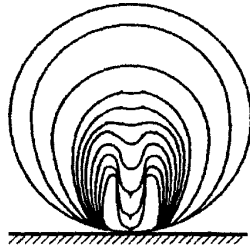


Рисунок 1.14 – Схема деформації сферичної бульбашки при її лусканні біля твердої стінки

Фото лускаючої бульбашки можна знайти в Інтернеті за адресою <http://home.att.net/~Berliner-Ultrasonics/u-s.html> (рис. 1.15).



Рисунок 1.15 – Фото лускаючої кавітаційної бульбашки

Якщо порівняти ці два рисунки, то можна відзначити певну подібність між математичною моделлю, описаною в [42], і фото рис. 1.15.

Умова виникнення парової кавітації, якщо не враховувати вплив розчиненого в робочому агенті газу, визначається параметром динамічної подібності (число кавітації) [43– 46]:

$$K = \frac{P_0 - P_{н.н}}{\rho v_0^2 / 2} > 1, \quad (1.14)$$

де P_0 - гідростатичний тиск в деякій точці потоку рідини, Па;

$P_{н.н}$ - тиск насиченої пари в рідині, Па;

ρ - густина рідини, кг/м³;

v_0 - швидкість потоку рідини при постійному P_0 , м/с.

Чим менша величина K при постійному $P_{н.н}$ тим більше зниження тиску допустиме в системі до початку кавітації.

Із залежності (1.14) випливає, що при течії рідини в насадках і зміні режимів так, щоб K було більше, менше або рівне 1, можна створювати різні режими течії рідини: від безкавітаційного до кавітаційного потоку з розвинутою кавітацією. Число кавітації являє собою відношення повного (абсолютного) тиску, при якому відбувається лускання бульбашки, до швидкісного напору потоку рідини.

Число кавітації K є мірою просторової густини потенціальної енергії, яка накопичується кавітаційними бульбашками в певному об'ємі рідини. З досліджень числа кавітації в локальній зоні, які проводилися за допомогою покадрового оброблення результатів швидкісної кінозйомки зони кавітації випливає, що при перевищенні амплітудою акустичного тиску свого граничного значення число кавітації досягає значень, близьких до одиниці [47]. При цьому у фазі максимального розширення практично уся кавітаційна зона, що розглядається, заповнена кавітаційними бульбашками, які витіснили капілярну рідину. Зростання гідродинамічних імпульсів тиску приводить до зменшення кількості бульбашок при збільшенні їх розмірів, тому число кавітації майже не змінюється.

Немає єдиної думки серед вчених про причини суттєвих відмінностей щодо міцності одних й тих самих рідин [48, 49]. У згаданих роботах показана залежність міцності рідин від кількості розчиненого в них газу і висунута гіпотеза про існування в рідинах центрів пониженої міцності у вигляді стабільно існуючих зародкових бульбашок, тобто ядер кавітації. Джерелом виникнення бульбашок є газ, замкнений в тріщинах твердої фази, де бульбашка може мати негативну кривизну, що сприяє її зберіганню при високих тисках. Проведені дослідження показують, що парова (газова) фаза може зберігатися не тільки в тріщинах і западинах на твердій поверхні. Вона може зберігатися також і в об'ємі рідини, покрита твердими і колоїдними частинками, що утворюють оболонки, які перешкоджають зменшенню і роздавлюванню бульбашок гідростатичним тиском. За цією причиною мабуть в багатьох випадках зона тисків, в якій нафтогазові суміші можуть існувати в метастабільному стані, є малою, або при наявності негативної кривизни вільний газ може існувати в середовищі при тисках, які

істотно перевищують тиск насичення нафти газом. Це означає, що в умовах нафтових свердловин за рахунок присутності багатьох рідких, газових і твердих компонентів у свердловинній продукції початок виділення газової фази при зниженні тиску можна оцінити без урахування переходу середовища в метастабільний стан за звичайними значеннями тиску насичення газом робочої рідини.

Утворення зародкових бульбашок за рахунок натягу [48] в рідині, який створюється вільними вихорами в звуковому полі, а також вихорами, що виникають при будь-яких механічних збудженнях рідини. При цьому бульбашки газової фази виникають не в мікронах низького тиску при прямому розтягу в процесі механічного збудження рідинного середовища, а в локалізованих зонах низького тиску, зв'язаних з вихорами і турбулентністю рідини. У роботі зазначено, що якщо знехтувати гідростатичним напором стовпа рідини, тоді тиск в будь-якій точці прямолінійного вільного вихору можна визначити за таким співвідношенням:

$$P = -\frac{\Gamma^2 \rho}{8\pi \bar{r}^2} + \frac{2\sigma}{r}, \quad (1.15)$$

де P - різниця тисків для рідини, що знаходиться в стані спокою і розглядуваної

точки вихору, Па;

Γ - параметр, який враховує процес циркуляції рідини;

ρ - густина рідини, кг/м³;

\bar{r} - радіус-вектор розглядуваного вихору, м;

r - радіус бульбашки, м;

σ - поверхневий натяг, Н/м.

Як видно з виразу (1.15), зменшення поверхневого натягу рідини на границі з паром (газом) може бути одним з способів зниження міцності рідини. За гіпотезою Гібса виникнення зародку газової фази проходить за рахунок теплового хаотичного руху молекул. Але це твердження є суперечливим, оскільки сьогодні прийнято вважати, що в будь-якому рідинному середовищі за рахунок теплового руху молекул виникають так звані локальні згущення і розрідження рідинного

середовища, тобто флуктуації густини, які набувають надалі статистичного характеру. В роботі [49] сказано, що при наявності твердих границь розділення фаз в процесі утворення бульбашок пари в рідині термодинамічний потенціал змінюється за законом:

$$\Delta\Phi = \pi\sigma\left(-\frac{2r^2}{3r_0} + r^2\right)(2 + 3\cos\Theta - \cos^3\Theta), \quad (1.16)$$

де σ - поверхневий натяг на межі з парою, Н/м;

r - радіус бульбашки, м;

r_0 - критичний радіус зародку (радіус, який відповідає метастабільному стану з максимумом термодинамічного потенціалу), м;

Θ - кут змочування.

З (1.16) випливає, що вагомий вплив на процес виникнення парогазової фази в рідинному середовищі має ступінь його змочування. В об'ємі рідини ($\Theta = 0$) ймовірність утворення зародку за рахунок флуктуацій є меншою, ніж на твердій поверхні розділу. При зміні кута змочування Θ від 0 до 90° нарощування потенціалу зменшується в 2 рази.

Природа виникнення кавітації при обробці привибійної зони свердловини самозакипаючими адіабатними потоками може бути віднесена до вихрової, вібраційної, приєднаної і рухомої. Парова фаза при цьому виникає при проходженні робочої рідини через насадку. Згідно експериментальних даних, які приводяться в роботі [50], при протіканні води в режимі самозакипаючого потоку через насадки діаметром 3 – 5 мм при відповідних швидкостях потоку коефіцієнт метастабільності складає біля 0,7. Це означає, що на виході з насадки в потоці міститься біля 30 % диспергованої парової фази, яка і викликає кавітацію.

Кермін, Мак Грев і Паркін [51], таким чином описують кавітацію. Досягнувши відповідного статичного тиску (або швидкості потоку) в носовому краю тіла в районі мінімуму тиску стає виразно видимою межа, вниз за потоком, від якої переміщуються кавітаційні бульбашки. Цей тип кавітації автори назвали "макроскопічною". Найбільш важливою властивістю мікроскопічних бульбашок є

їх нерухомість щодо поверхні тіла. Мікроскопічна бульбашка порівняно поволі росте у фіксованій точці поверхні. Досягнувши розміру, приблизно рівного товщині витіснення, вона зноситься потоком, услід за тим в цій же точці поверхні починає розвиватися наступна бульбашка. Можна прийняти, що точки поверхні, в яких виникають нерухомі мікроскопічні бульбашки, є найдрібніші тріщини. Ці тріщини, що містять газове ядро, яке росте при пониженому тиску унаслідок дифузії і що живлять послідовний ряд породжуваних ними газових бульбашок мікрокавітації (модель газового ядра кавітації Гарвея).

На процес виникнення і розвитку кавітації також істотно впливають фізико-хімічні і термодинамічні властивості рідини, такі, як в'язкість, тиск насиченої пари, крутизна залежності тиску насиченої пари від температури, поверхневий натяг, кількість розчиненого і вільного газу.

Проте, ступінь впливу кожного з вказаних чинників різна і, як показують дослідження і досвід експлуатації [52-57], різного устаткування, ряд чинників залежно від умов роботи устаткування можна вважати другорядними і не брати до уваги для практичних оцінок.

Модифікований взірець гідродинамічного кавітатора було використано для очищення фільтрів в нафтових свердловинах в Омані. В результаті проведених робіт на двох свердловинах поточний дебіт збільшився в 2,5 рази порівняно з початковим. Перші випробування кавітаторів для руйнування парафіногідратних пробок в ліфтовій колоні були проведені в нафтових свердловинах Уренгойського родовища (Росія). В свердловині № 6467 суцільна пробка в інтервалі 180–285 м була пройдена з використанням кавітатора КВШ-38 за 8 годин (13 м/год). В свердловині № 6464 аналогічна пробка довжиною 450 м була пройдена за 20 годин (22,5 м/год).

Для досягнення необхідних технологічних результатів створюють умови для зародження штучної кавітації [58,59], яку можна отримати, вдуваючи повітря або інший газ в область розрідження за обтікаючим тілом. Тому важливими чинниками, що характеризують штучну кавітацію, є кількість газу, необхідна для утворення і підтримки каверни, і сила опору кавітуючого тіла (кавітатора).

Лускання кавітаційних бульбашок супроводжується утворенням мікроструменів, діаметри, яких можуть бути в межах 5-200 мкм, і набувати швидкості в межах від 50 до 1500 м/с, тиск в точках лускання може бути $(1-1,5) \cdot 10^3$ МПа.

Інтенсифікація технологічних процесів відбувається завдяки накладенню полів мікровихорів кавітацій великої інтенсивності на звичайний процес мікротовихового потоку.

З приведених оглядових матеріалів щодо механізму виникнення імпульсно-хвильових процесів в свердловинних умовах і їх практичного використання виявлено наступне:

1. Існуючі способи експлуатації свердловин з високов'язкими нафтами малоефективні, позаяк при підніманні нафти на денну поверхню у зв'язку зі зменшенням її температури зростає її в'язкість, що призводить до значних втрат тиску, як у привибійній зоні пласта, так і у стовбурі свердловини. Це суттєво знижує продуктивність свердловин, які експлуатують горизонти з високов'язкою нафтою.

2. Відомі імпульсно-хвильові методи не знайшли широкого застосування через високу енерговитратність.

3. До цього часу ще недостатньо вивчені аспекти впливу гідродинамічних пульсацій і створюваних ними фізичних полів на зниження в'язкості нафти.

Для досягнення цієї мети необхідно вирішити наступні задачі:

- провести теоретичні дослідження явищ, які відбуваються під час проходження закрученого потоку робочої рідини через гідродинамічний кавітатор;

- визначити вплив ступеню закручування на стійкість структури потоку, що обертається;

- провести термодинамічний аналіз процесу кавітації в закрученому потоці і отримати аналітичні залежності, які дозволять визначити яка частина кінетичної енергії, що підводиться до струминного апарата, витрачається на роботу насоса і

подолання тертя, а яка частина енергії витрачається на приріст внутрішньої теплоти нафти.

4. Ці та інші ефекти потребують додаткових досліджень. Основні результати показують, що вплив кавітації на зменшення в'язкості важких вуглеводнів є істотним і тому, враховуючи ці обставини, необхідно удосконалити технологію і конструкцію струминного насосу, що у поєднанні з використанням дії пульсуючих потоків дозволить наблизити вирішення складної задачі з інтенсифікації видобутку високов'язкої нафти.

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАКРУЧЕНОГО ПОТОКУ РОБОЧОЇ РІДИНИ ПІД ЧАС ПРОХОДЖЕННЯ ЇЇ ЧЕРЕЗ ГІДРОДИНАМІЧНИЙ КАВІТАТОР

Застосування ефектів кавітації в різних галузях промисловості базується на використанні сучасною наукою теорії закрученого потоку і описує рух рідини в центральній області струменю, як обертання цілого (твердого) тіла, а периферійну частину – як вільний вихор, при цьому для випадків слабого і сильного (із зворотними струменями) закручування потоку пропонуються дві різні системи рівнянь. Існування прецесуючого вихрового ядра (ПВЯ) (тобто джерела кавітації – відсутності суцільності середовища) в потоці робочої рідини передбачається при певних числах Рейнольдса.

Широке використання закручених потоків із зворотними струменями і з розвиненим прецесуючим вихровим ядром у кавітаторах та інших пристроях зумовило необхідність більш глибокого дослідження закручених потоків.

2.1. Теоретичні дослідження руху вихрового ядра в закрученому потоці робочої рідини з центральною областю зниженого тиску

При описанні руху вихрового ядра у вільному закрученому струмені рідини необхідно врахувати, що, згідно з експериментальними даними [60, 61], вихрове ядро може скручуватися по довжині струменю і здійснює рух навколо осі струменя в зоні між областю зворотних потоків і приграничним зовнішнім шаром (рис. 2.1). Саме вихрове ядро в цьому випадку піддається впливу основного закрученого потоку, при цьому необхідно врахувати, що, у зв'язку зі співмірними розмірами вихрового ядра і струменя, дія на нього буде неоднаковою, внаслідок нерівномірного розподілу швидкостей в самому струмені.

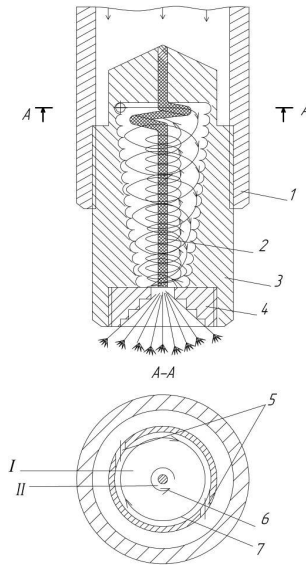


Рисунок 2.1 - Схема руху закручених зворотних потоків у гідродинамічному кавітаторі:

- I – зона між областю зворотних потоків; II – зона зниженого тиску*
1 – патрубок; 2 – пружинний стержень; 3 – корпус кавітатора;
4 – ступінчастий дифузор; 5 – вхідні тангенціальні канали;
6 – зворотний закручений потік; 7 – основний закручений потік

Оскільки положення вихрового ядра в різних перерізах струменя також залежатиме від зміни поля швидкостей по довжині струменя, то приймемо ряд умов:

- вісь вихрового ядра співпадає з віссю абсцис;
- потік, що обертається, має розвинену зону кавітації ($Re > 1,8 \cdot 10^4$);
- вихрове ядро знаходиться в області, обмеженою зовнішньою границею зони кавітації і приграничним шаром потоку, що обертається ($a \leq x \leq b$).

Математичний опис процесу руху вихрового ядра, з урахуванням вищевикладеного, можливо виконувати по площинах, перпендикулярних аксіальному напрямку руху основного закрученого потоку, при цьому вісь координат буде розташована в геометричному центрі потоку (рис.2.2).

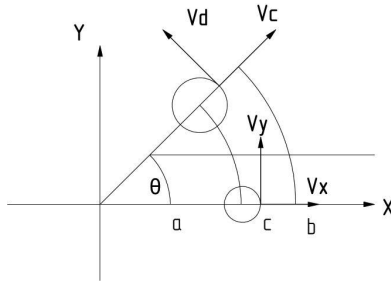


Рисунок 2.2 - Розташування вихрового ядра в закрученому потоці робочої рідини

Рух вихрового ядра потоку рідини, що обертається, в площині описується двома рівняннями [62]:

$$X - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \cdot \left(\frac{\partial^2 V_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2} \right) = V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_x}{\partial y}, \quad (2.1)$$

$$Y - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial P}{\partial y} + \nu \cdot \left(\frac{\partial^2 V_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_y}{\partial y^2} \right) = V_x \frac{\partial V_y}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_y}{\partial y}, \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} = 0$$

(2.3)

де X — проекція прискорення масових сил на вісь X , м/с^2 ;

Y — проекція прискорення масових сил на вісь Y , м/с^2 ;

P - тиск, Па;

V_x, V_y — проекції швидкості на осі координат, м/с ;

ν — кінематична в'язкість, $\text{м}^2/\text{с}$;

ρ — густина, кг/м^3 ;

x, y — координати, м.

Для отримання складових швидкості вихрового ядра з даної системи рівнянь (2.1-2.3) необхідно задати розподіл швидкостей основного (який набігає на вихрове ядро) потоку, що обертається, тиск у вихровому ядрі і початковий розподіл швидкостей у ньому.

Приймемо в першому наближенні, що розподіл швидкостей основного закрученого потоку відповідає потенційному обертанню [60]:

$$W = \frac{C^l}{r} = \frac{C^l}{\sqrt{(x-x_a)^2 + y^2}} \quad (2.4)$$

де C^l - постійна;

x, y – поточні координати, м;

x_a - відстань від центру струменя (початок координат) до границі області зворотних течій, м.

Тиск в самому вихровому ядрі визначається виразом [61]:

$$P = \rho \cdot \omega^2 \cdot \ln(\sqrt{(x-x_a)^2 + y^2}) \quad (2.5)$$

де ρ - густина робочої рідини, м³/кг;

ω - завихреність, що визначається як

$$\omega = 4 \cdot \pi \cdot \Omega \quad (2.6)$$

де Ω — кутова швидкість, с⁻¹.

Приймаючи обертання вихрового ядра як одиночний вихор, можна записати в декартових координатах вираз для швидкості [63]:

$$V = \frac{\Gamma}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{1}{\sqrt{(x-x_c)^2 + y^2}} \quad (2.7)$$

де x_c — відстань від центру потоку, що обертається, до центру прецесуючого вихрового ядра, м;

Γ — циркуляція швидкості вихрового ядра, яка визначається за наведеним в

[62] виразом:

$$\Gamma = 2 \cdot \pi \cdot \Omega \cdot r^2 = 2 \cdot \pi \cdot \Omega \cdot ((x - x_c)^2 + y^2) \quad (2.8)$$

звідси швидкість є функцією координат і кутової швидкості:

$$V = \Omega \cdot \sqrt{(x - x_c)^2 + y^2} \quad (2.9)$$

Для визначення проєкцій прискорення масових сил в рівняннях руху (2.1, 2.2) прийнято, що на вихрове ядро діє сила динамічного тиску і відцентрова сила [64]:

$$P = \frac{\rho \cdot V^2}{2}, \quad (2.10)$$

$$P = \rho \cdot W^2 \cdot (x - x_a) \quad (2.11)$$

Тоді, підставляючи вирази (2.4-2.11) в рівняння руху і нерозривності (2.1-2.3) шляхом перетворень відповідних функцій (постійні, які отримані в першому наближенні і приймалися рівними нулю) отримаємо приведену нижче систему диференціальних рівнянь:

$$\begin{aligned} & \rho \cdot W^2 \cdot (x - x_a) - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial(\rho(4 \cdot \pi \cdot \Omega)^2 \cdot \ln \sqrt{(x - x_a)^2 + y^2})}{\partial x} + \\ & + v \cdot \left(\frac{\partial^2(\Omega \cdot \cos \alpha \cdot \sqrt{(x - x_n)^2 + y^2})}{\partial x^2} + \frac{\partial^2(\Omega \cdot \cos \alpha \cdot \sqrt{(x - x_n)^2 + y^2})}{\partial y^2} \right) = \quad (2.12) \\ & = (\Omega \cdot \cos \alpha \cdot \sqrt{(x - x_n)^2 + y^2}) \cdot \frac{\partial V_x}{\partial x} + (\Omega \cdot \sin \alpha \cdot \sqrt{(x - x_n)^2 + y^2}) \cdot \frac{\partial V_x}{\partial y}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\rho \cdot W^2}{2} - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial(\rho(4 \cdot \pi \cdot \Omega)^2 \cdot \ln \sqrt{(x - x_a)^2 + y^2})}{\partial y} + \\ & + v \cdot \left(\frac{\partial^2(\Omega \cdot \sin \alpha \cdot \sqrt{(x - x_n)^2 + y^2})}{\partial x^2} + \frac{\partial^2(\Omega \cdot \sin \alpha \cdot \sqrt{(x - x_n)^2 + y^2})}{\partial y^2} \right) = \quad 2.13) \\ & = (\Omega \cdot \cos \alpha \cdot \sqrt{(x - x_n)^2 + y^2}) \cdot \frac{\partial V_y}{\partial x} + (\Omega \cdot \sin \alpha \cdot \sqrt{(x - x_n)^2 + y^2}) \cdot \frac{\partial V_y}{\partial y}, \end{aligned}$$

$$\frac{\partial(\Omega \cdot \cos \alpha \cdot \sqrt{(x-x_n)^2 + y^2})}{\partial x} + \frac{\partial(\Omega \cdot \sin \alpha \cdot \sqrt{(x-x_n)^2 + y^2})}{\partial y} = 0 \quad (2.14)$$

де α - кут, утворений віссю потоку, що обертається, і центром вихрового ядра.

Для визначення відстані від центру закрученого потоку до межі області кавітації використаємо положення про перехід функції тиску через нуль (у зовнішній частині потоку тиск позитивний, а у внутрішній — негативний), відповідно, в точці x_a тиск буде рівний нулю. Тоді

$$\Delta P = \rho \cdot \omega^2 \cdot \ln(\sqrt{(x-x_a)^2 + y^2}) = 0 \quad (2.15)$$

але, оскільки густина і завихреність більше нуля, то

$$\ln(\sqrt{(x-x_a)^2 + y^2}) = 0, \quad (2.16)$$

$$\text{або } (x-x_a)^2 + y^2 = 1 \quad (2.17)$$

тобто визначення шуканої величини можливе при наданні поточних координат як неявній функції.

Виконуючи часткове диференціювання і дотримуючись подібності, після підстановки (2.10 — 2.11) в (2.13 — 2.14) отримаємо наступну систему рівнянь:

$$\begin{aligned} \rho \cdot \frac{c^2 \cdot (x-x_a)}{(x-x_a)^2 + y^2} - \frac{(4 \cdot \pi \cdot \Omega)^2 \cdot (x-x_c)}{(x-x_a)^2 + y^2} + v \cdot \Omega \cdot \cos \alpha = \\ = (\Omega \cdot \cos \alpha)^2 \cdot (x-x_c) + \Omega^2 \cdot y \cdot \cos \alpha \cdot \sin \alpha, \end{aligned} \quad (2.18)$$

$$\begin{aligned} \rho \cdot \frac{c^2}{2 \cdot ((x-x_a)^2 + y^2)} - \frac{(4 \cdot \pi \cdot \Omega)^2 \cdot y}{(x-x_a)^2 + y^2} + v \cdot \Omega \cdot \sin \alpha = \\ = (\Omega \cdot \sin \alpha)^2 \cdot y + \Omega^2 \cdot y \cdot \cos \alpha \cdot \sin \alpha, \end{aligned} \quad (2.19)$$

$$\frac{\Omega \cdot \cos \alpha \cdot (x-x_c) + \Omega \cdot \sin \alpha \cdot (x-x_c)}{\sqrt{(x-x_c)^2 + y^2}} = 0, \quad (2.20)$$

$$x^2 - 2 \cdot x \cdot x_a + x_a^2 + y^2 = l \quad (2.21)$$

У даній системі (2.18-2.21) необхідно задати поточні координати X і Y , константу C , густину середовища ρ і кінематичну в'язкість ν . При цьому невідомими є α - кут, утворений віссю потоку, що обертається, і центром вихрового ядра, Ω — кутова швидкість, x_a і x_c — відстань від початку координат за віссю X до межі кавітації і центру вихрового ядра відповідно. Це дозволяє розв'язати цю систему відносно вказаних величин.

Тоді з рівняння (2.21), задаючись значеннями поточних координат, можна визначити відстань від центру потоку, що обертається, до границі зони кавітації.

Щоб обчислити відстань до центру вихрового ядра можна використати рівняння нерозривності потоку, що має вигляд (2.20) для даного випадку. Прирівнюючи чисельник до нуля, після нескладних перетворень отримаємо залежність x_c від координати y , x і утвореного віссю потоку і вихрового ядра кута α :

$$x_c = y \cdot \operatorname{tg} \alpha + x \quad (2.22)$$

Для визначення решти невідомих отримані рівняння (2.18-2.19) руху вихрового ядра в потенційному потоці, що обертається, були перетворені і отримали наступний вигляд:

$$\Omega^2 \cdot ((x - x_c) \cdot \cos \alpha - y \cdot \sin \alpha - \frac{(4 \cdot \pi)^2 \cdot y}{\sin \alpha \cdot ((x - x_c)^2 + y^2)}) - \Omega \cdot \nu + \frac{\rho \cdot c^2}{2 \cdot \sin \alpha \cdot ((x - x_c)^2 + y^2)} = 0, \quad (2.23)$$

$$\Omega^2 \cdot (\cos \alpha \cdot (x - x_c) + y \cdot \sin \alpha + \frac{(4 \cdot \pi)^2 \cdot (x - x_c)}{\cos \alpha \cdot ((x - x_c)^2 + y^2)}) - \Omega \cdot \nu - \frac{\rho \cdot c^2 \cdot (x - x_c)}{\cos \alpha \cdot ((x - x_c)^2 + y^2)} = 0 \quad (2.24)$$

З даних квадратних рівнянь відносно кутової швидкості і умови рівності коефіцієнтів при однакових ступенях, а також враховуючи, що відомо тільки x_a , отримаємо рівняння для визначення кута між осями струменя і вихрового ядра:

$$\alpha = \arctg\left(-\frac{l}{2 \cdot (x - x_a)}\right) \quad (2.25)$$

Кутова швидкість закрученого потоку визначається з виразу (2.23).

Для отримання числових значень використаємо наступний алгоритм:

- задаються x, y, c, ρ, γ ;
- з рівняння (2.21) визначається відстань до границі зворотних потоків x_a ;
- за приведеними раніше розрахунковим рівнянням визначаються α, Ω, x_c ;
- розраховуються складові швидкості вихрового ядра за координатними осями і швидкість обертання основного потоку (за формулою (2.4)):

$$V_x = \Omega \cdot \cos \alpha \cdot \sqrt{(x - x_{\bar{n}})^2 + y^2}, \quad (2.26)$$

$$V_y = \Omega \cdot \sin \alpha \cdot \sqrt{(x - x_{\bar{n}})^2 + y^2} \quad (2.27)$$

Отримані результати моделювання руху вихрового ядра в закрученому потоці з розвинуеною зоною кавітації представлені у вигляді залежностей швидкості руху прецесуючого вихрового ядра від координати X (рисунки 2.3-2.5), кутової швидкості обертання вихрового ядра від швидкості основного закрученого потоку (рисунки 2.6-2.8), зміни положення центру вихрового ядра відносно границі кавітації основного закрученого потоку (рисунки 2.9-2.10).

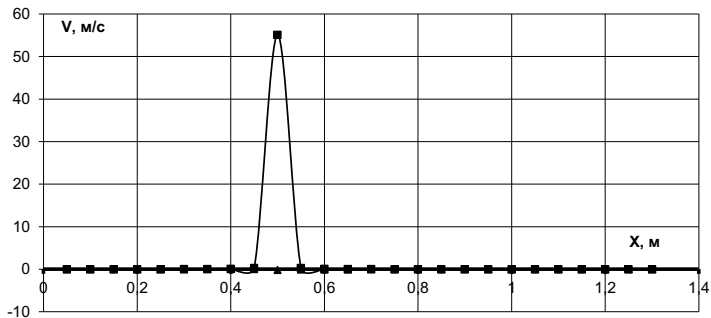


Рисунок 2.3 – Швидкість у вихровому ядрі в перетині потоку при $y=0,05$:

■ — в проекції на вісь x ; ▲ — в проекції на вісь y

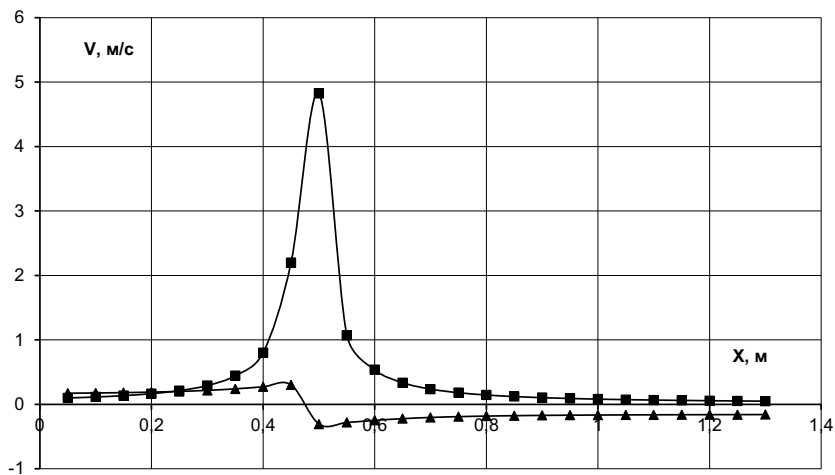


Рисунок 2.4 – Швидкість у вихровому ядрі в перерізі потоку при $y=0,25$

■ — в проекції на вісь x ; ▲ — в проекції на вісь y

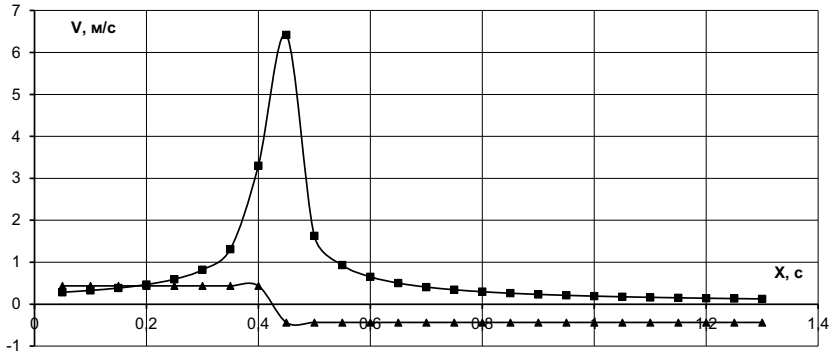


Рисунок 2.5 – Швидкість у вихровому ядрі в перерізі потоку при $y=0,5$:

■ — в проекції на вісь x ; ▲ — в проекції на вісь y

Аналіз отриманих залежностей швидкості у вихровому ядрі показав, що вихрове ядро розташовується безпосередньо поблизу зони кавітації і має максимум аксіальної швидкості (рис.2.4), а у міру руху вихрового ядра відбувається зменшення аксіальної і збільшення тангенціальною складових швидкості, при цьому само ядро збільшується в розмірах (рис.2.4-2.5), що, при проведенні аналогії з утворенням вихорів при обтіканні потоком робочої рідини твердих тіл, дозволяє припустити надалі його подібнення на декілька вихрових ядер.

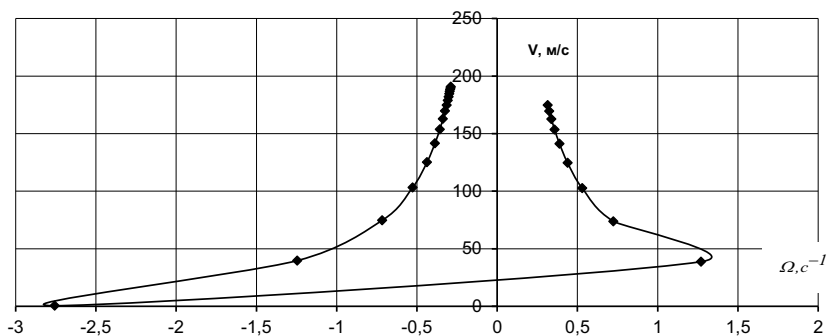


Рисунок 2.6 – Залежність кутової швидкості обертання вихрового ядра від швидкості потоку, що обертається, при $y=0,05$.

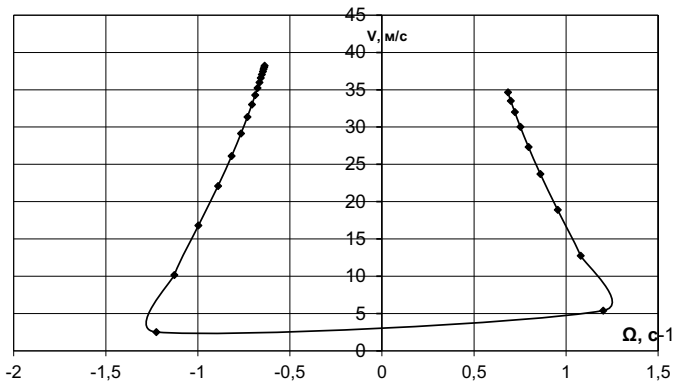


Рисунок 2.7 – Залежність кутової швидкості обертання вихрового ядра від швидкості потоку, що обертається, при $y=0,25$

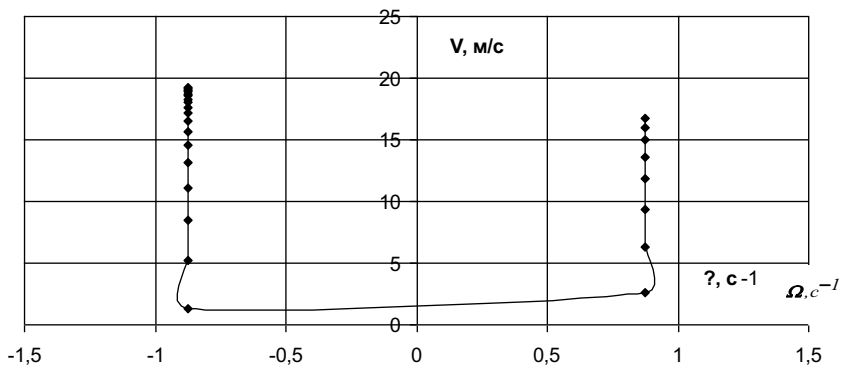


Рисунок 2.8 – Залежність кутової швидкості обертання вихрового ядра від швидкості закрученого потоку при $y=0,5$

Аналіз рисунків 2.6-2.8 залежності кутової швидкості обертання вихрового ядра від швидкості основного закрученого потоку показав, що з рухом вихрового ядра, швидкість V істотно не впливає на кутову швидкість.

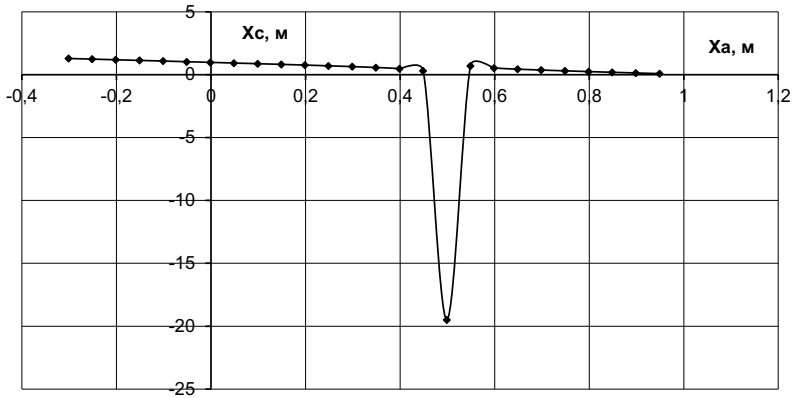


Рисунок 2.9 – Зміна положення центру вихрового ядра відносно границі зворотних потоків при $y=0,05$

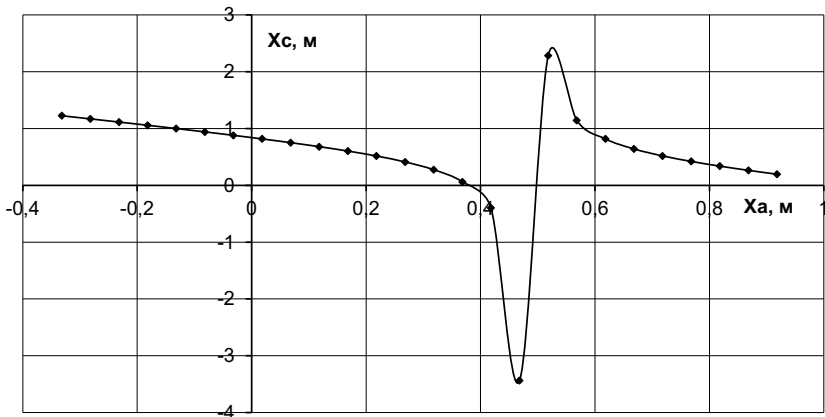


Рисунок 2.10 – Зміна положення центру вихрового ядра відносно границі зворотних потоків при $y=0,25-0,5$

Зміна положення центру вихрового ядра відносно границі кавітації (рис.2.9-2.10) показує, що вихрове ядро знаходиться практично на одній відстані від межі зворотних потоків, за винятком вузької області, де відбуваються його нутації, викликані, очевидно коливаннями аксіальної швидкості вихрового ядра.

2.2 Виникнення явища нутації вихрового ядра в закрученому потоці робочої рідини і сили, які сприяють її виникненню

З вище наведеного можна зробити висновок, що вихрове ядро окрім прецесуючого руху навколо геометричного центру струменя здійснює нутацію. Очевидно, що наявність такого руху впливатиме на основний закручений потік.

Для опису даного процесу взаємодії вихрового ядра із закрученим потоком прийемо, що сам закручений потік – потенційний, а зміна швидкості диктується осцилюючою складовою, яка залежить від нутації вихрового ядра. При цьому самі нутації мають гармонійний характер. Тобто, розглядаючи приграничний шар на вихровому ядрі, що здійснює гармонійні коливання з малою амплітудою, швидкість потенційної течії змінюватиметься згідно із законом [58]:

$$U_{(x,y,t)} = \bar{U}_{(x,y)} + U_{I(x,y,t)} \cdot \sin(n \cdot t) \quad (2.28)$$

тоді, рівняння руху і рівняння нерозривності для коливального руху можуть бути представлені таким чином [58, 59]:

$$\frac{\partial V_{xI}}{\partial t} = \frac{\partial U_I}{\partial t} + v \cdot \frac{\partial^2 V_{xI}}{\partial y^2}, \quad (2.29)$$

$$\frac{\partial u_{xI}}{\partial x} + \frac{\partial V_{yI}}{\partial y} = 0 \quad (2.30)$$

де $\bar{U}_{(x,y)}$ - швидкість основного потенційного потоку, що обертається, м/с:

$$\bar{U}_{(x,y)} = \frac{C}{\sqrt{x^2 + y^2}} \quad (2.31)$$

$U_{I(x,y,t)}$ - додаткова швидкість, що надається основному потоку вихровим ядром [56, 58]:

$$U_{I(x,y,t)} = \frac{\tilde{A}(1 - e^{-r^2/(4 \cdot v \cdot t)})}{2 \cdot \pi \cdot r}, \quad (2.32)$$

де Γ — циркуляція швидкості, яка визначалася за виразами, наведеними в розділі 2.1;

ν - частота коливань вихрового ядра, с^{-1} .

Згідно [64, 65] така система рівнянь дає розв'язок для осцилюючої складової повздовжньої швидкості:

$$u_{I(x,y,t)} = U_{I(x)} \cdot \left(\sin(n \cdot t) - e^{-\frac{y}{\delta_0}} \cdot \sin\left(n \cdot t - \frac{y}{\delta_0}\right) \right) \quad (2.33)$$

де $\delta_0 = \sqrt{\frac{2 \cdot \nu}{n}}$.

Далі з рівняння нерозривності (2.29), як вказано в [58] можна визначити поперечну складову осцилюючої швидкості і отримати вираз для додаткового градієнта тиску $F_{(x,y)}$:

$$F_{(x,y)} = \frac{I}{2} \cdot U_I \cdot \frac{dU_I}{dx} \cdot \bar{F}\left(\frac{y}{\delta_0}\right) \quad (2.34)$$

де $\bar{F}\left(\frac{y}{\delta_0}\right) = e^{-\frac{y}{\delta_0}} \cdot \left(\left(2 + \frac{y}{\delta_0}\right) \cdot \cos\left(\frac{y}{\delta_0}\right) - \left(1 - \frac{y}{\delta_0}\right) \cdot \sin\left(\frac{y}{\delta_0}\right) - e^{-2 \cdot \frac{y}{\delta_0}} \right)$ (2.35)

Підставляючи в рівняння (2.32) вираз для циркуляції швидкості (2.8), а отриманий вираз в рівняння (2.33), то, після нескладних перетворень, повздовжня складова осцилюючої швидкості визначається для даного процесу як:

$$u_I = \Omega \cdot \left(1 + e^{-x^2/4\nu t} \right) \cdot \left(\sin(nt) - e^{-\frac{y}{\delta_0}} \cdot \sin\left(nt - \frac{y}{\delta_0}\right) \right) \cdot x \quad (2.36)$$

З рівняння (2.31) знаходимо другу складову осцилюючої швидкості з наступними граничними умовами:

$$u_0 = V_0 = 0 \quad \text{при } y = 0;$$

$$u_0 = \bar{U}_{(x)} \quad \text{при } y = \infty.$$

Тоді, проінтегрувавши, отримаємо вираз для осцилюючої швидкості:

$$V_I = \Omega \cdot \left(1 + \frac{e^{-x/4vt}}{4 \cdot v \cdot t}\right) \cdot \left(y \cdot \sin(nt) + \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \delta_0 \cdot e^{-\frac{y}{\delta_0}} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{4} + nt - \frac{y}{\delta_0}\right)\right) \quad (2.37)$$

Підставляючи отримані складові швидкості в рівняння (2.34) отримаємо вираз для додаткового градієнта тиску, який створюється нутацією прецесуючого вихрового ядра в закрученому потоці у випадку розвиненої зони кавітації:

$$F_{(x,y)} = \frac{1}{2} \cdot x \cdot \Omega^3 \cdot \left(1 + e^{-\frac{(x^2+y^2)}{4 \cdot v \cdot t}}\right) \cdot \left(1 + e^{-\frac{(x^2+y^2)}{4 \cdot v \cdot t}} - \frac{(x^2+y^2)}{2 \cdot v \cdot t} \cdot e^{-\frac{(x^2+y^2)}{4 \cdot v \cdot t}}\right) \cdot \left(1 + \frac{e^{-x/4vt}}{4 \cdot v \cdot t}\right) \cdot \left(y \cdot \sin(n \cdot t) + \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \delta_0 \cdot e^{-\frac{y}{\delta_0}} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{4} + n \cdot t - \frac{y}{\delta_0}\right)\right) \quad (2.38)$$

При моделюванні нутацій вихрового ядра і оцінки його дії на потік, що обертається, був реалізований наступний алгоритм:

- задаються частота нутацій вихрового ядра v , число n і визначається значення δ_0 ;
- задаються поточні координати x , y , час t і кінематична в'язкість струменя;
- визначаються кутова швидкість обертання закрученого потоку і осцилюючих складових швидкості за виразами (2.23) і (2.36—2.38) відповідно;
- розраховується додатковий градієнт тиску за формулою (2.38).

Отримані результати моделювання для додаткового градієнта тиску, створюваного нутацією прецесуючого вихрового ядра в закрученому потоці у разі розвиненої зони кавітації представлені у вигляді залежностей осцилюючої швидкості і додаткового градієнта тиску від часу (рисунки 2.11-2.12), від частоти коливань вихрового ядра (рисунки 2.13—2.14) (при $t=300$ с), від координати X і Y (рисунки 2.15-2.18).

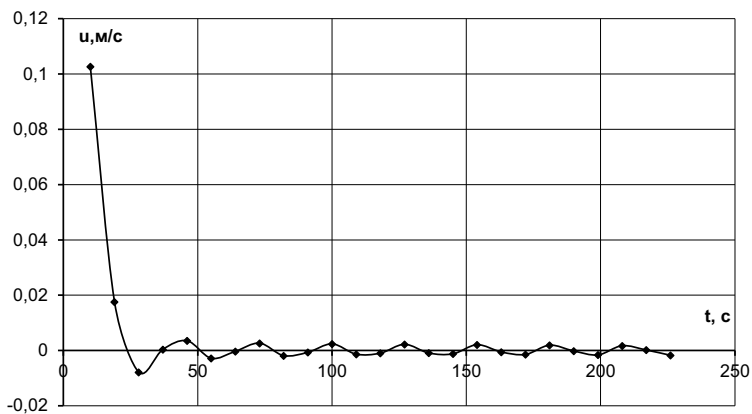


Рисунок 2.11 — Зміна складової швидкості u_1 від часу

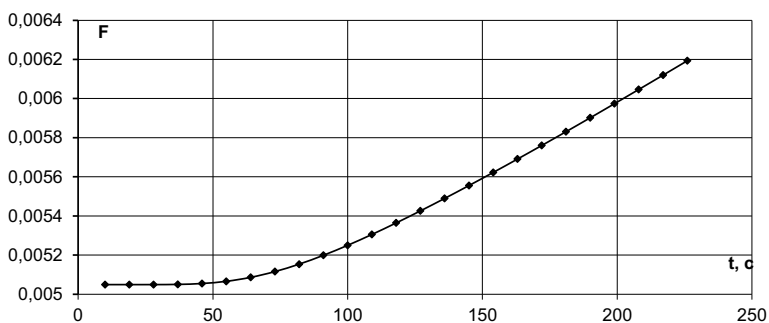


Рисунок 2.12 – Залежність додаткового градієнта тиску від часу

Зміна осцилюючої швидкості за часом (рис. 2.11) показує різке падіння її в початковий період часу (до 30 секунд), а з плином часу — швидкість здійснює затухаючі коливання, що пояснюється нутацією вихрового ядра при його прецесії в закрученому потоці рідини. Зростання додаткового градієнта тиску з часом (рис.2.12) свідчить про зміну усередненого профілю швидкості внаслідок коливань вихрового ядра, яке рухається в закрученому потоці.

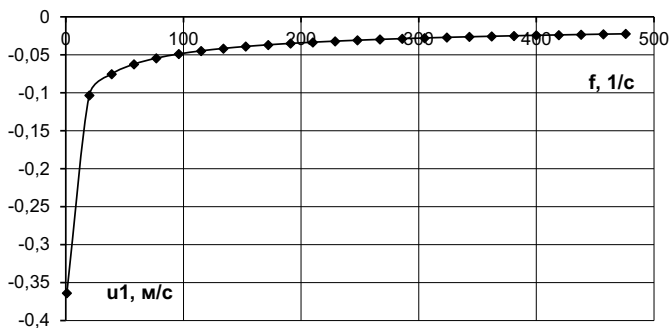


Рисунок 2.13 – Зміна складової швидкості u_1 від частоти

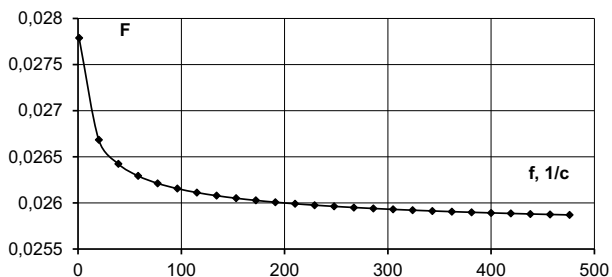


Рисунок 2.14 – Зміна додаткового градієнта тиску від частоти коливань вихрового ядра

Аналіз залежностей швидкості і додаткового градієнта тиску від частоти коливань вихрового ядра (рис. 2.13-2.14) показав, що при збільшенні частоти відбувається різке зменшення абсолютних величин швидкості і додаткового градієнта тиску, що може пояснюватися розпадом вихрового ядра на декілька дрібніших, з вищою частотою коливань. При цьому наближення до частоти турбулентних пульсацій підтримує швидкість і градієнт додаткового тиску на практично постійному рівні.

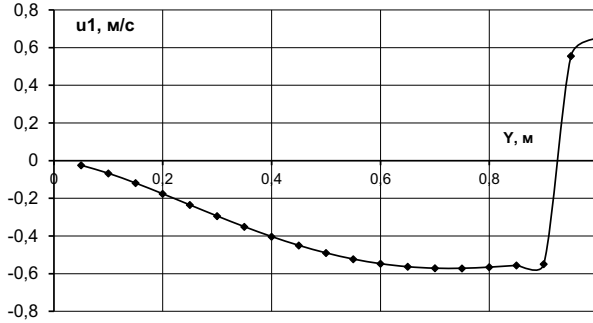


Рисунок 2.15 – Зміна складової швидкості u_1 від координати Y

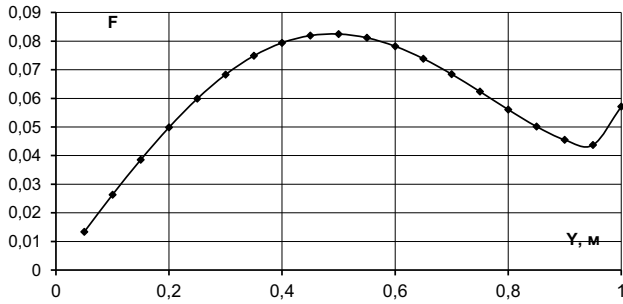


Рисунок 2.16 – Зміна додаткового градієнта тиску від координати Y

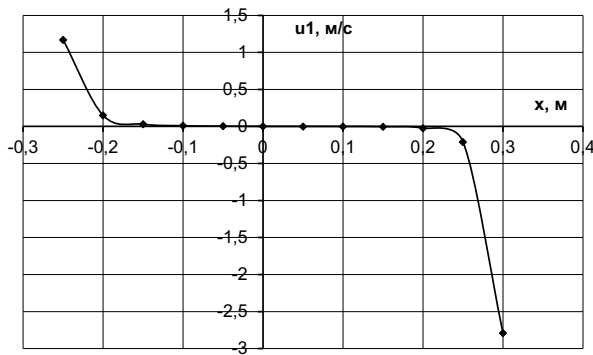


Рисунок 2.17 – Зміна складової швидкості u_1 від координати X

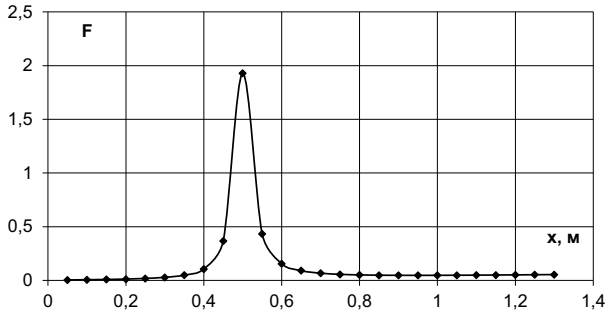


Рисунок 2.18 – Зміна додаткового градієнта тиску від координати X

Розглядаючи зміну осцилюючої швидкості і додаткового градієнта тиску в залежності від координат (рис.2.15-2.18) необхідно відзначити, що, як в повздовжньому, так і в поперечному напрямках спостерігається досягнення максимуму цих функцій (за винятком швидкості за координатою Y (рис. 2.15), що пояснюється наближенням ядра до зовнішнього приграничного шару закрученого потоку), при цьому розташування його співпадає з розташуванням самого вихрового ядра (див. рис.2.9-2.10 і рис. 2.18).

2.3 Критерії стійкості закрученого потоку робочої рідини при наявності прецесуючого вихрового ядра

Відомі критерії стійкості закручених потоків визначають границі руйнування структури з появою області з низьким тиском в центральній частині закрученого потоку і виникнення прецесуючого вихрового ядра [60, 64, 65]. Тобто дані критерії не дозволяють зробити оцінку стійкості закрученого потоку при існуванні кавітації.

Для визначення умов стійкості закручених потоків при існуванні вихрового прецесуючого ядра використаємо спосіб розрахунку нестационарних періодичних течій, наведений в підрозділі 2.2. При цьому приймається припущення, що основний потік є стаціонарним. Додатково на потік накладаються нестационарні коливання вихрового ядра.

Виходячи з припущення, що основний вплив на стійкість закрученого потоку здійснюється вихровим прецесуючим ядром розв'язок поставленої задачі можливий при мінімізації амплітуди коливань останнього. Для цього розглянемо амплітуду коливань швидкості як функцію від осцилюючої складової u_1 , представлену у вигляді [65]:

$$A = U_1 \cdot \frac{\partial u_1}{\partial x} \quad (2.39)$$

Використовуючи дані, отримані в попередньому підрозділі 2.2 і з урахуванням наведених раніше припущень і граничних умов була отримана залежність амплітуди коливань швидкості від пульсацій вихрового ядра:

$$A = \Omega^2 x (1 + L) \left(\sin(nt) - e^{-\frac{y}{\delta}} \sin\left(nt - \frac{y}{\delta}\right) \right) \left(\sin(nt) - e^{-\frac{y}{\delta}} \sin\left(nt - \frac{y}{\delta}\right) \right) \left(1 + L - \frac{x^2 L}{2vt} \right) \quad (2.40)$$

де
$$L = e^{-x^2/4vt} \quad (2.41)$$

Аналіз отриманої залежності (2.40) показав, що амплітуда коливань буде дорівнювати нулю при виконанні однієї з наступних умов K1, K2, K3:

$$1) \quad 1 + L = 0 \quad (2.42)$$

$$2) \quad \sin(nt) - e^{-\frac{y}{\delta}} \sin\left(nt - \frac{y}{\delta}\right) = 0 \quad (2.43)$$

$$3) \quad 1 + L - \frac{x^2 L}{2vt} = 0 \quad (2.44)$$

Очевидно, що перша умова стабілізується і в границі дорівнює одиниці (при необмеженому збільшенні часу).

Друга умова визначатиме зміну гармонійних коливань швидкості з плином часу. При цьому великий вплив на характер коливань надає хвильове число n .

Третя умова також стабілізується з плином часу і прагне в границі до одиниці.

Отримані результати моделювання амплітуди швидкості в закрученому потоці у випадку розвиненої зони кавітації представлені у вигляді залежностей амплітуди і отриманих критеріїв від координат (рисунки 2.19-2.22), від частоти коливань вихрового ядра (рисунки 2.23-2.24), від часу (рисунки 2.25-2.27), від хвильового числа (рисунки 2.28-2.32), від коефіцієнта кінематичної в'язкості (рисунки 2.33 - 2.35).

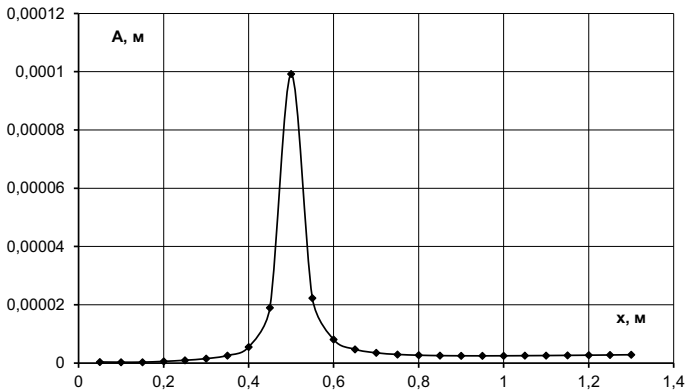


Рисунок 2.19 – Залежність амплітуди коливань швидкості в закрученому потоці від координати X

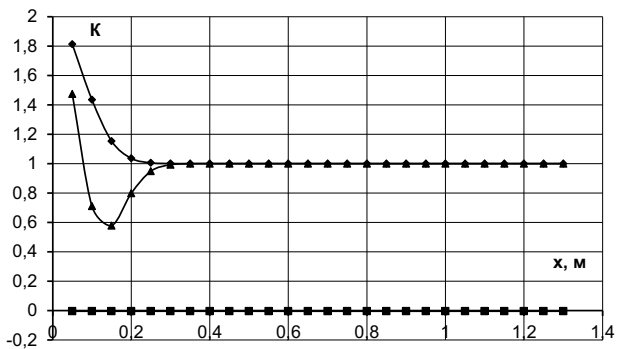


Рисунок 2.20 – Залежність критеріїв від координати X :

◆ - перший критерій; ■ — другий критерій; ▲ — третій критерій

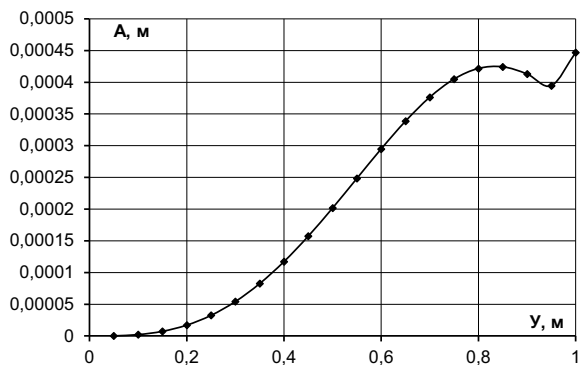


Рисунок 2.21 – Залежність амплітуди коливань швидкості в закрученому потоці від координати Y

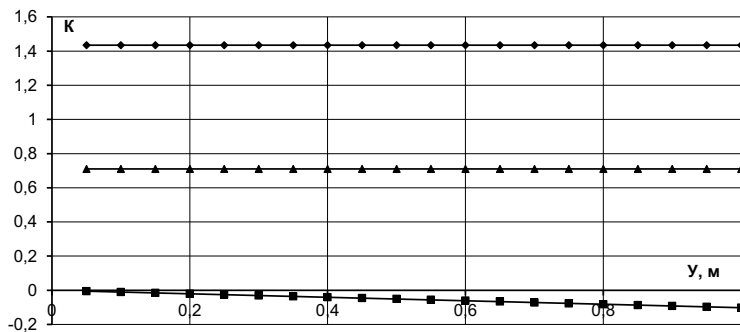


Рисунок 2.22 – Залежність критеріїв від координати Y :
 ◆ - перший критерій; ■ — другий критерій; ▲ — третій критерій

Розглядаючи зміну амплітуди коливань швидкості закрученого потоку і критеріїв (2.45-2.47) в залежності від координат (рис.2.19-2.22) необхідно відзначити, що в поперечному напрямі спостерігається досягнення максимуму амплітуди в області розташування вихрового ядра. Це свідчить про обмеження розповсюдження поперечних хвиль, що створюються прецесуючим вихровим ядром. У той же час в повздовжньому напрямі, починаючи від границі зони кавітації і до зовнішнього приграничного закрученого потоку відбувається збільшення амплітуди коливань швидкості, підтверджуючи експериментальні дані

ряду інших авторів [60]. Розгляд залежності критеріїв від координат показує їх стабілізацію поза зоною зворотних потоків як в подовжньому, так і в поперечному напрямках.

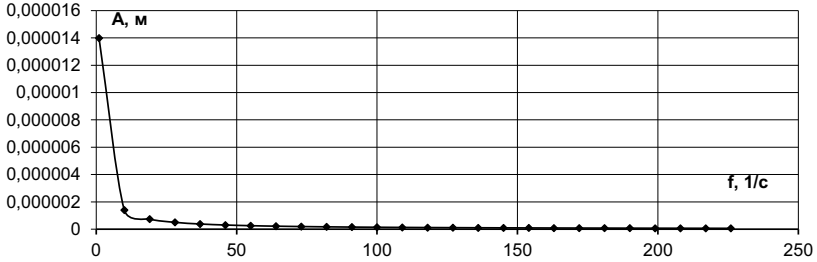


Рисунок 2.23 – Залежність амплітуди коливань швидкості в закрученому потоці від частоти коливань вихрового ядра

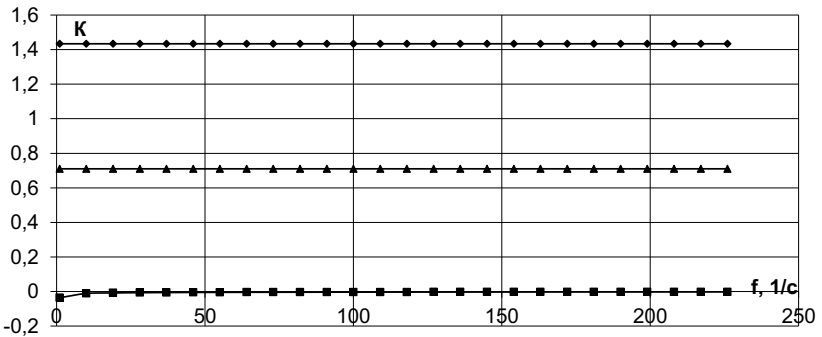


Рисунок 2.24 – Залежність критеріїв від частоти коливань вихрового ядра
 ◆ - перший критерій; ■ — другий критерій; ▲ — третій критерій

Аналіз зміни амплітуди коливань швидкості потоку, що обертається, при збільшенні частоти пульсацій вихрового ядра (рис.2.23) показує, що основний внесок вносять низькочастотні пульсації, а критерії практично не змінюються при збільшенні f (рис.2.24), що підтверджує припущення про розпад вихрового ядра на декілька дрібніших, з вищою частотою коливань.

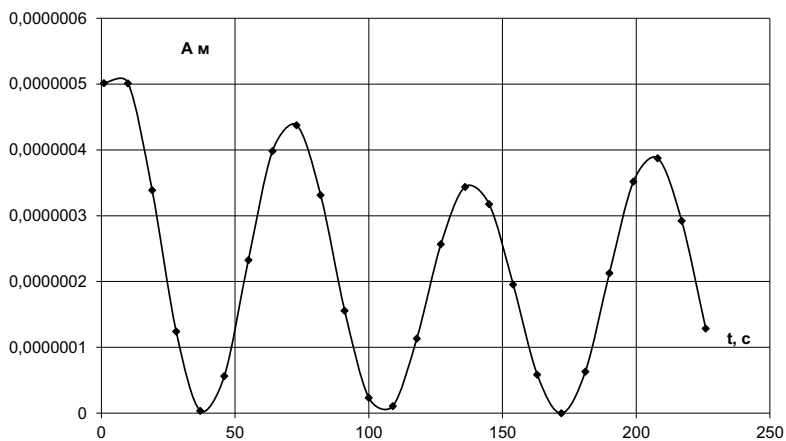


Рисунок 2.25 – Залежність амплітуди коливань швидкості в закрученому потоці від часу

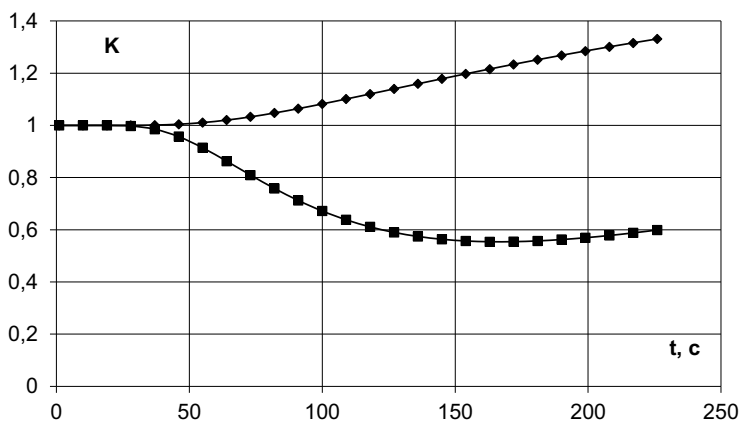


Рисунок 2.26 – Залежність критеріїв від часу:
 ◆ - перший критерій; ■ – третій критерій

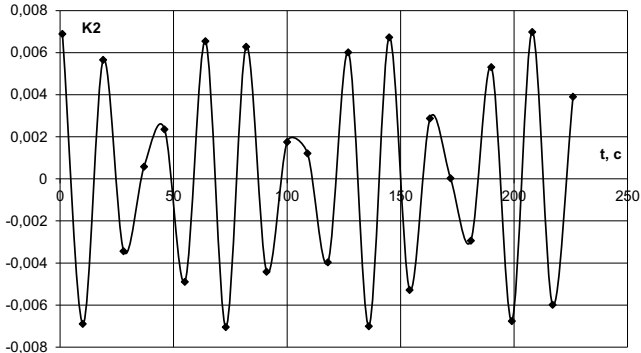


Рисунок 2.27 – Залежність другого критерію від часу

Залежність амплітуди від часу (рис.2.25) характеризується гармонійним характером, при цьому період коливань швидкості закрученого потоку рівний 60 с. Аналіз зміни критеріїв в часі (рис.2.26-2.27) показує, що перший критерій трохи збільшується з часом, а третій критерій – зменшується і стабілізується при $t=150$ с. Тобто основний вплив на характер зміни амплітуди створює другий критерій (рис.2.27), решта критеріїв робить згладжуючий вплив.

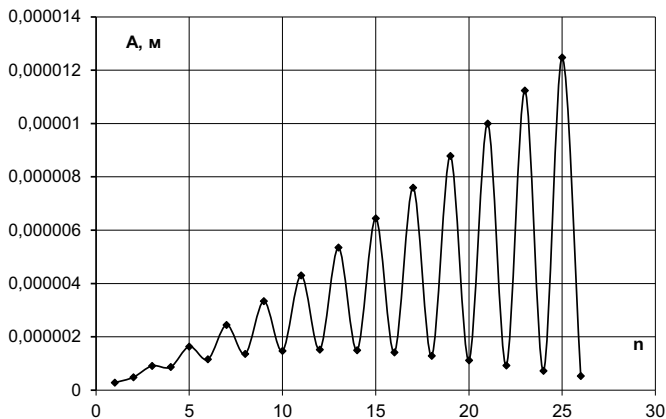


Рисунок 2.28 – Залежність амплітуди коливань швидкості в закрученому потоці від хвильового числа n

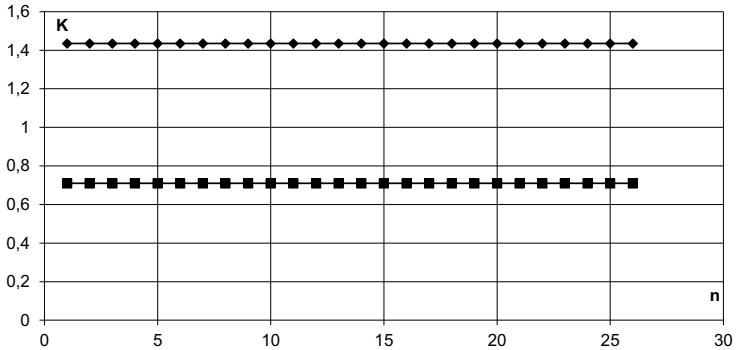


Рисунок 2.29 – Залежність критеріїв від числа n
 ◆ - перший критерій; ■ – третій критерій

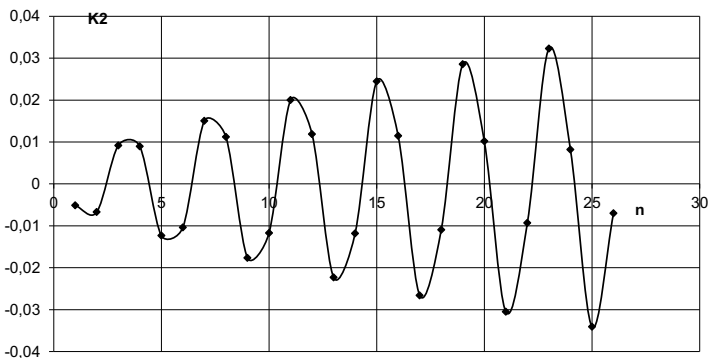


Рисунок 2.30 – Залежність другого критерію від хвильового числа n

Аналіз залежності амплітуди коливань швидкості закрученого потоку, від хвильового числа (рис. 2.28) показує її гармонійний характер, при цьому із збільшенням числа n відбувається збільшення амплітуди коливань. Знаходження амплітуди в області позитивних значень пояснюється впливом першого і третього критеріїв, а гармонійний характер функції — впливом другого (рис.2.29-2.30).

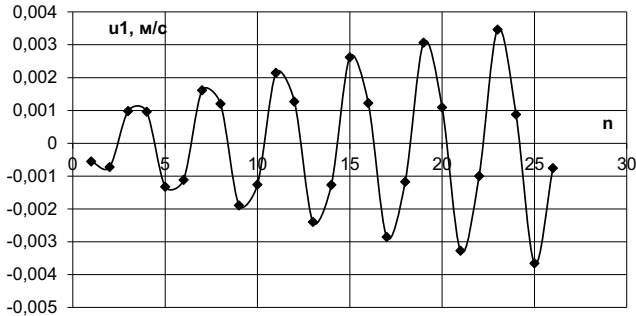


Рисунок 2.31 – Залежність осцилюючої швидкості u_1 від хвильового числа n

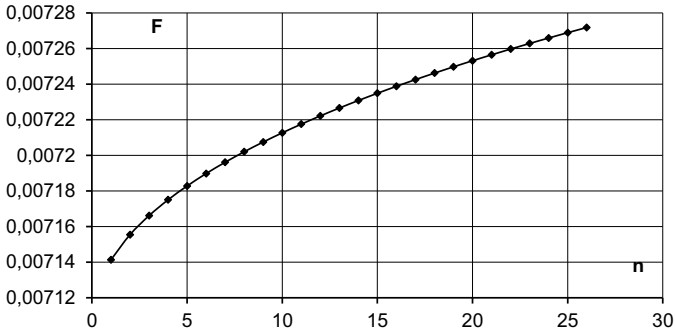


Рисунок 2.32 – Залежність сили F від хвильового числа n

Порівнюючи залежність осцилюючої швидкості вихрового ядра від хвильового числа (рис. 2.31) і характер зміни другого критерію (рис. 2.30) необхідно відзначити їх тотожність, а враховуючи, що на характер амплітуди коливань основний вплив створює саме другий критерій, то можна зробити висновок про значний вплив вихрового ядра на стійкість закрученого потоку з розвиненою зоною кавітації.

Вплив кінематичної в'язкості на амплітуду коливань швидкості закрученого потоку (рис. 2.33) має двоякий характер – до величини $0,000005 \text{ м}^2/\text{с}$ амплітуда знижується, а потім монотонно збільшується. При цьому подібність профілів графіків амплітуди і третього критерію (рис. 2.34) дозволяють зробити

висновок про визначальний вплив останнього. Вплив кінематичної в'язкості на другий критерій (рис. 2.35) незначний.

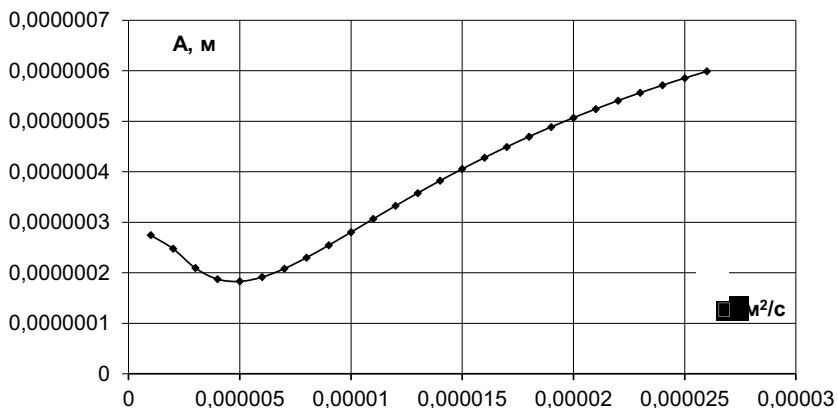


Рисунок 2.33 – Залежність амплітуди коливань швидкості в закрученому потоці від кінематичної в'язкості

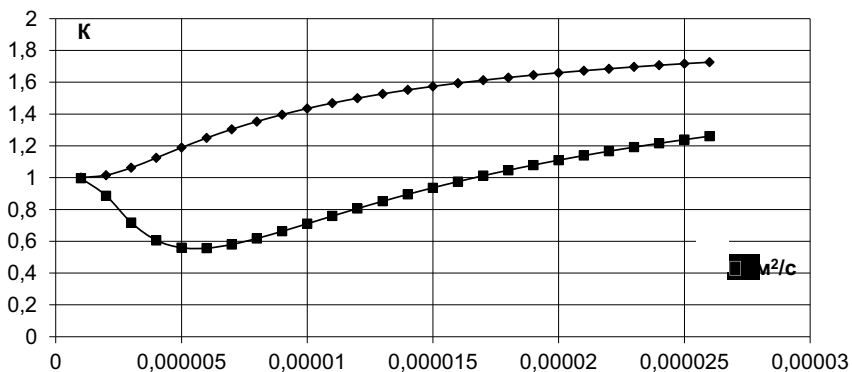


Рисунок 2.34 – Залежність критеріїв від кінематичної в'язкості
 ◆ - перший критерій; ■ – третій критерій

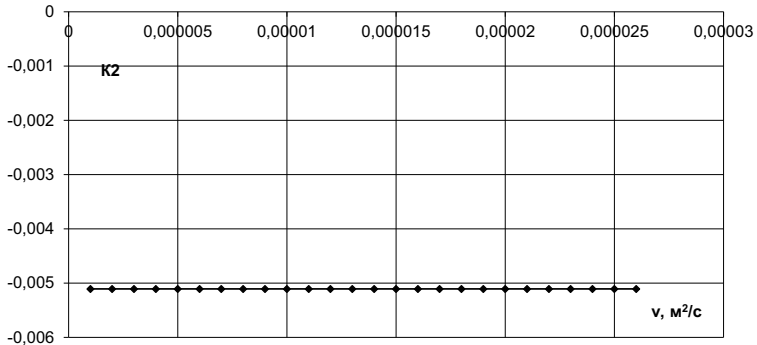


Рисунок 2.35 - Залежність другого критерію від кінематичної в'язкості

2.4 Вплив ступеня кручення на стійкість структури закрученого потоку

Проведений аналіз теоретичних даних і дослідження чинників, що впливають на стійкість вихрових структур дозволили виявити, що з мірою руху відбувається збільшення вихрового ядра за розмірами з подальшим його руйнуванням. У той же час відомо, що мінімальна кутова швидкість власного обертання твердого тіла, необхідна для стійкого його руху визначається рівністю [66]:

$$\omega_{min} = \frac{2}{I} \cdot \sqrt{P \cdot a \cdot A} \quad (2.45)$$

де P - сила Коріоліса;

a - відстань від точки опори тіла, що обертається, до центру обертання, м;

A - момент інерції відносно осі, перпендикулярної до осі власного обертання;

I — полярний момент інерції відносно центральної осі.

Враховуючи, що обертання вихрового ядра описується як обертання твердого тіла, а основні параметри ПВЯ визначені в [60] і містять коефіцієнт кручення, об'єму витрату рідини, пов'язані з частотою коливань вихрового ядра:

$$\begin{aligned}
 & - \frac{fD_e^3}{Q} \text{ — приведена частота;} \\
 & - \frac{G_\theta D_e}{\rho Q^2} \text{ — приведений момент кількості руху;} \\
 & - \frac{\Delta P \cdot D_e^3}{G_\theta} \text{ — приведена інтенсивність пульсацій тиску.}
 \end{aligned}$$

То тоді можна отримати функцію ступеня кручення потоку в залежності від витрати і частоти коливань ПВЯ за умови стійкості потоку, що сам обертається.

Приймаючи точку опори за центр струменя і визначаючи момент інерції як момент інерції ПВЯ відносно осі, яка перпендикулярна осі його обертання і підставляючи значення P , a , A , I в рівняння (2.45) з урахуванням виразів для основних параметрів ПВЯ [60], отримуємо:

$$\omega_{min} = \frac{2 \cdot a^2 \cdot f}{\sqrt{R \cdot L}} \quad (2.46)$$

Потік моменту кількості руху в осьовому напрямку в закрученому потоці визначається виразом, наведеним в [60]:

$$G_\theta = \frac{\pi}{2} \cdot \rho \cdot u_{mo} \cdot \omega_{mo} \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^3 \quad (2.47)$$

Ступінь кручення в потоці, згідно з [60]:

$$S = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{G_\theta \cdot d}{\rho \cdot Q^2} \quad (2.48)$$

Тоді, прирівнюючи (2.46) до ω_{mo} у (2.47) і підставляючи у вираз (2.49) отримуємо уточнену залежність ступеня кручення потоку від об'ємної витрати і частоти прецесії вихрового ядра в області стійкої рівноваги закрученого струменя:

$$S = \frac{\pi^2}{8} \cdot \frac{d^4 \cdot f \cdot u_{mo} \cdot a^2}{Q^2 \cdot \sqrt{R \cdot L}} \quad (2.49)$$

де u_{mo} - максимальна осьова швидкість потоку, м/с;

f - частота ПВЯ, с⁻¹;

d - діаметр вихідного отвору вихрової камери, м;

a - відстань від центру струменя до перерізу ПВЯ, м;

R - відстань за радіусом до центру ПВЯ, м;

L - довжина камери завихрення, м;

Q - об'ємна витрата робочої рідини, м³/с.

Аналіз отриманої залежності показав, що ступінь кручення потоку прямо пропорційний частоті коливань прецесуючого вихрового ядра і обернено пропорційна квадрату об'ємної витрати рідини, тобто забезпечення стійкості закрученого потоку при варіюванні витрати вимагає відповідної зміни ступеню кручення (рис.2.36) або зміни частоти коливань ПВЯ [67, 69].

Знаючи величину ступеня кручення, можна визначити витрату рідини, що в свою чергу дозволяє за допомогою табульованих значень або відомих номограм визначати тиск, який необхідно створити поверхневим насосним агрегатом щоб забезпечити кавітаційно-пульсаційні коливання на виході з вихрової камери, достатні для руйнування механічної структури високов'язкої нафти. Такі ж обчислення можна проводити у зворотному напрямку, тобто, знаючи тиск, який створюється поверхневим насосом, можна визначити ступінь кручення або витрату робочої рідини, що забезпечить зниження в'язкості нафти під час роботи гідродинамічного кавітатора у свердловинних умовах.

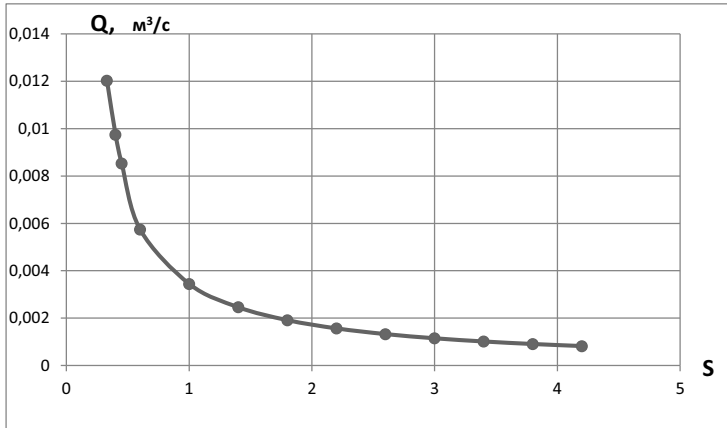


Рисунок 2.36 – Залежність витрати рідини від ступеня кручення

Провівши розрахунки ступеню кручення за формулою (2.48) і уточненою формулою (2.49), були отримані результати, які зведені в таблицю 2.1.

Таблиця 2.1 – Значення ступеню кручення потоку при різних витратах робочої рідини

Витрата рідини, м³/с	0,001	0,002	0,004	0,006	0,008	0,01
Степінь кручення за фор. (2.48)	3,04	1,67	0,74	0,64	0,41	0,38
Степінь кручення за фор. (2.49)	3,20	1,80	0,80	0,70	0,45	0,42

Проаналізувавши отримані результати, можна зробити висновок, що значення ступеню кручення потоку будуть нижчими на 5-10 % при обчисленні за формулою (2.50), яка не враховує впливу частоти ПВЯ на колову швидкість потоку робочої рідини. А в реальному процесі відбувається взаємний вплив ПВЯ і швидкості руху робочої рідини, що призводить до збільшення значень ступеню кручення.

Таким чином, в результаті проведених досліджень отримані умови рівноваги закрученого потоку в області існування розвиненої зони кавітації і прецесуючого вихрового ядра, що дозволяє визначити найбільш раціональні параметри роботи гідродинамічного кавітатора при варіюванні його продуктивності і спосіб стабілізації закрученого потоку.

2.5 Термодинамічний аналіз процесу кавітації в закрученому потоці

Для вирішення даного завдання необхідно визначити яка частина енергії в процесі кавітації витрачатися на роботу і яка частина безпосередньо переходить в теплову енергію. Тобто необхідно визначити який процес відбувається при кавітації з погляду термодинаміки.

Якщо скласти енергетичний баланс, то енергія, підведена до процесу, буде дорівнювати енергії, витраченій на роботу насоса $E_{нас.}$, яка використовується на подолання тертя $E_{тер.кав.}$ (в основному в кавітаторі), і приріст внутрішньої теплоти нафти $E_{нагр.}$.

$$E_{нас.} = E_{тер.кав.} + E_{нагр.}, \text{ Дж} \quad (2.50)$$

Тепло, безпосередньо передане нафті в процесі роботи насоса і кавітатора визначається за наступним виразом:

$$Q_{нагр.} = \rho_n \cdot V_n \cdot C_n \cdot (T_2 - T_1), \text{ Дж} \quad (2.51)$$

де ρ_n - густина нафти, кг/м³;

V_n - об'єм нафти, м³;

C_n - питома теплоємність нафти, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$

$T_2 - T_1$ - різниця температур нафти, К

Втрати кінетичної енергії в самому кавітаторі:

$$\Delta P_{кав.} = \xi \cdot \rho_n \cdot \frac{u^2}{2}, \text{ Па} \quad (2.52)$$

де ξ - коефіцієнт місцевого опору;

u - швидкість руху нафти в кавітаторі, м/с;

Коефіцієнт місцевого опору в кавітаторі визначається за формулою

$$\xi = C \frac{F}{F_0} \cdot \frac{1}{\left(1 - \frac{F}{F_0}\right)^3}, \quad (2.53)$$

де F – площа перерізу тіла, яке обтікається при кавітації, м²;

F_0 – площа перерізу комбінованого сопла кавітатора, м²;

C – коефіцієнт пропорційності ($C = 0,01$).

Швидкість руху нафти в кавітаторі:

$$u = K \sqrt{\frac{2P}{\rho_n}}, \text{ м/с} \quad (2.54)$$

де P – тиск, що розвивається насосом, Па;

$K = 0,97-0,99$ – коефіцієнт швидкості.

Втрати енергії на тертя:

$$E_{тер.кав.} = V_n \cdot \Delta P_{кав.}, \text{ Дж} \quad (2.55)$$

В той же час термодинамічний цикл визначає, що вся підведена енергія витрачається на роботу і тепло:

$$E = A + Q, \text{ Дж}$$

(2.56)

$$\dot{A} = \frac{1}{n-1} (P_1 V_1 - P_2 V_2), \quad (2.57)$$

$$Q = C_V \frac{n-k}{n-1} (T_2 - T_1) \quad (2.58)$$

де n – показник політропи;

k – показник адіабати;

C_V – об'ємна теплоємність нафти, Дж/кг·К.

Позначивши $\alpha = c \cdot \xi^2 = 0,09$ і $F_{пр.} = F/F_0$. Тоді отримуємо при підстановці і перетворенні енергетичний баланс в наступному вигляді:

$$E_{нас} = \frac{V_n \cdot \alpha \cdot P_{нас} \cdot F_{привед}}{(n-1) \cdot (1 - F_{привед})^3} + V_n \cdot \rho_n \cdot C_V \cdot (n-k) \cdot (T_2 - T_1), \text{ Дж} \quad (2.59)$$

$$\text{де } C_V = \left(\frac{31,56}{\sqrt{\rho_n}} \right) \cdot (762 + 3,39 \cdot T_{\text{сеп}});$$

$$T_{\text{сеп}} = \frac{T_1 + T_2}{2}.$$

Даний баланс можливо використовувати для оцінки і розрахунку кількості тепла, що отримується в процесі кавітації при наявності експериментальних даних з нагріву нафти, яка проходить через кавітатор, а також для визначення ефективності самого процесу – його політропи, і, відповідно, співвідношення роботи і теплової енергії, що отримується в результаті процесу кавітації.

Результати виконаних досліджень представляють інтерес з точки зору подальшого розвитку теорії і практичного застосування явища кавітації в закручених потоках і можуть бути використані при розробці, дослідженні і впровадженні пульсаційно-кавітаційних технологій і підвищенні ефективності роботи пульсуючих пристроїв, зокрема, на основі використання закономірностей явища кавітації.

Отримана уточнена аналітична залежність ступеня кручення потоку від витрати рідини, частоти коливань вихрового ядра і конструктивних параметрів в умовах стійкості самого закрученого потоку показала, що ступінь кручення потоку прямо пропорційний частоті коливань прецесуючого вихрового ядра і обернено пропорційний квадрату масової витрати рідини. Тобто забезпечення стійкості закрученого потоку при варіюванні витрати вимагає відповідної зміни ступеню кручення або впливу на частоту коливань прецесуючого вихрового ядра.

Проведений термодинамічний аналіз процесу кавітації у закрученому потоці свідчить, що частина кінетичної енергії, яка підводиться до струминного апарата витрачається на роботу насоса і подолання тертя, а друга частина енергії витрачається на приріст внутрішньої теплоти нафти. Наведені аналітичні залежності дають змогу безпосередньо визначити цей енергетичний баланс.

На підставі отриманих теоретичних залежностей були розроблені і реалізовані в комп'ютерних програмах наступні розрахунки: залежність коефіцієнта кручення потоку від частоти коливань вихрового ядра і

конструктивних параметрів в області стійкості закрученого потоку; моделювання процесії вихрового ядра в закрученому потоці; дослідження коливань швидкості в закрученому потоці; коливання швидкості при взаємодії закручених струменів.

Всі ці розрахунки об'єднані в один комплекс програм, що дозволяє після введення вихідних даних набути не тільки чисельних значень, але і графічного відображення результатів, сумісних з представленням їх в інших різних програмних продуктах, зокрема в середовищі «Excel».

РОЗДІЛ 3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПУЛЬСАЦІЙНО-КАВІТАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ, ЩО ВИНИКАЮТЬ В ПРОЦЕСІ РОБОТИ ГІДРОДИНАМІЧНОГО КАВІТАТОРА

3.1 Схема і принцип дії гідродинамічного кавітатора для створення синергічного впливу на високов'язкі вуглеводні

При проектуванні гідродинамічного кавітатора був проведений аналіз аналогічних вітчизняних та зарубіжних пристроїв, таких як генератор Гартманівського типу, вихрові генератори, гідроакустичні випромінювачі з резонуючими стержнями (пластиною, мембраною), пристрої, спроектовані на основі трубки Вентурі та інші.

Вихрові гідроакустичні генератори [14], принцип дії яких ґрунтується на зміні напрямку потоку або на взаємодії двох і більше закручених струменів між собою. Генерація коливальних визначається нестійкістю обертового струменя, деформацією периферійного потоку з періодичною пульсацією, а також при зриванні обертового потоку із зрізу вихідного конусу. Струмінь рідини подається через тангенціально розташований отвір (або декілька отворів) і приходить в обертовий рух у камері завихрення, виходячи з неї через звужений вихідний отвір, збільшує обертовий рух і зривається з гострої кромки вихідного отвору. При цьому виникають пульсації вихідного потоку. Для їх підсилення через центральний отвір подається струмінь, величину якого можна регулювати. Якщо центральний струмінь змістити з ексцентриситетом 0,5-1,5 мм, то інтенсифікується розвиток автоколивального процесу, збільшується амплітуда прецесії приосьового потоку, підвищується рівень пульсації тиску і швидкості в периферійному вихорі і відповідно росте потужність випромінюваного поля і к.к.д. генератора.

Виникнення хімічних реакцій у полі ультразвукових хвиль тісно пов'язане з явищем кавітації, яка сприяє утворенню порожнин в рідині з наступним їх лусканням і супроводжується інтенсивними гідравлічними ударами. Кавітаційна

порожнина утворюється всередині рідини при умові, що тиск знижується до величини, яка є меншою за межу міцності цієї рідини [70-72].

Нами також був розглянутий гідродинамічний випромінювач вихрового типу [15], в якому створювались обертові потоки рідини в протилежних напрямках. Для цього використовувались циліндричний корпус і приспособлення для створення обертових потоків рідини, виконане у вигляді циліндричних коаксиально розташованих елементів, які утворюють кільцеві зазори на виході, а зі сторони входу виконані гвинтові канали. Ці гвинтові канали виконані на складних циліндричних елементах і мають протилежний напрямок. Також циліндричні елементи мають конічну форму. Такі пристрої випробовувались у лабораторних умовах і хоча отримані хороші результати, потрібно і надалі проводити дослідження і пробувати використовувати їх на практиці.

Проаналізувавши вище сказане і, враховуючи позитивні та негативні сторони існуючих генераторів, ми поставили перед собою задачу удосконалити конструкцію гідродинамічного кавітатора, який би створював інтенсивність поля великого значення. Для цього використовуємо конусоподібну вихрову камеру з тангенціальними каналами і з внутрішньою поверхнею корпусу, виконаною у вигляді гвинтової поверхні для більшого завихрення потоку рідини. Щоб збільшити інтенсивність генеруючого поля та утворення періодично зривної кавітації з швидким лусканням кавітаційних каверн, нами запропоновано дифузор із ступінчастими гострими кромками і кутом розкриття більше 30° .

Для зменшення витрат робочої рідини потрібно зменшити діаметр сопла критичної частини. Оскільки ця величина гранична і залежить від очищення робочої рідини (практично використовуються фільтри з діаметрами не більшими як 2,5 мм), то діаметр сопла можна брати не менше 3 мм, бо сопло може засмітитися піском, окалиною і т. п. шламом, який проскочить через фільтр. Нами запропоновано використовувати дифузор з діаметром сопла критичної частини більше 3 мм, а також пружинний стержень меншого діаметру ніж діаметр сопла, що буде створювати кільцеву щілину з площею поперечного перерізу приблизно рівною критичному. Наявність пружинного стержня ініціює утворення

спіралеподібного вихрового шнура, який обертаючись навколо стержня, деформує периферійний потік, викликаючи в ньому періодичні пульсації швидкості і тиску, що призводить до збільшення інтенсивності генеруючого поля.

3.2 Проектування стенду для проведення досліджень з виявлення впливу фізичних полів, створюваних гідродинамічним кавітатором на зниження в'язкості важких нафт

Для проведення досліджень нами було спроектовано стенд, який складається з таких основних частин: силового модуля, гідродинамічного кавітатора, камери, де б досліджувалися фізичні поля, первинних датчиків і вторинної вимірювальної апаратури, необхідної для визначення параметрів фізичних полів.

Силовий модуль стенду має насос, який забезпечує витрати, в середньому $0,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ при тиску 10 МПа через сопло з площею поперечного перерізу приблизно $7,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$. Це може би бути насос плунжерного, шибєрного, роторного або шестерневого типу. Також потрібний електродвигун з потужністю до 3 кВт і числом обертів приблизно 50 с^{-1} (3 000 об/хв). Електродвигун і насос повинні бути змонтовані на спільній рамі та з'єднані між собою муфтами. Обов'язково повинно бути заземлення. Схема лабораторного стенду зображена на рис. 3.1.

Гідравлічну частину стенду зроблено з замкнутим циклом, наприклад: робоча рідина з технічної ємності через всмоктувальну лінію потрапляє в насос, звідти в нагнітальну лінію і через витратомір і фільтр подається в гідроакустичний кавітатор, який розташований в камері досліджень, заповненій рідиною, звідки через вихідну лінію відпрацьована рідина повертається в технічну ємність.

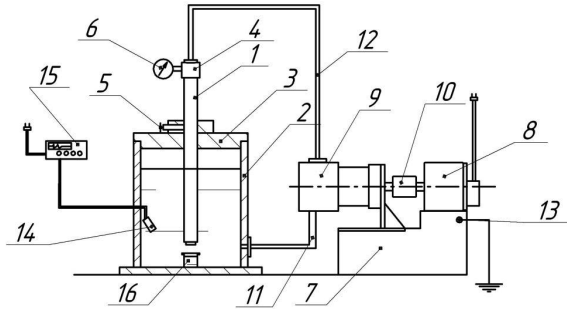


Рисунок 3.1 – Схема лабораторного стенду для визначення інтенсивності енергетичного поля, створюваного гідродинамічним кавітатором:

- 1 – гідродинамічний кавітатор; 2 – металева камера; 3 – кришка камери;
 4 – перехідник; 5 – гвинт стопорний; 6 – манометр; 7 – рама; 8 – електродвигун;
 9 – поршневий насос; 10 – муфта; 11 – всмоктувальна лінія; 12 – нагнітальна лінія; 13 – клемма заземлення; 14 – магнітострикційний датчик; 15 – осцилограф;
 16 – капсула з високов'язкою нафтою

Для камери (технічної ємності), в якій працює пристрій- кавітатор, необхідно розрахувати максимально допустимий тиск за формулою:

$$P_{max} = k_i P_{\dot{e}}$$

(3.1)

де $k_i = 1,5$ - коефіцієнт надійності;

$P_{\dot{e}}$ - тиск в камері, Па.

Напруження, які виникають у камері, σ_k визначаються з формули кільцевих радіальних і осьових напружень:

$$\sigma_k = \sigma_o = \frac{P_{max} D_{\dot{a}i}}{2\delta} \leq [\sigma_{\delta}]$$

(3.2)

де $D_{\dot{a}i}$ - внутрішній діаметр камери, м;

δ - товщина стінки кам;

$[\sigma_{\delta}]$ - допустимі напруження при розтягу для матеріалу камери, Па.



Рисунок 3.2 – Фотографія лабораторного стенду для дослідження роботи гідродинамічного кавітатора

Дослідження на лабораторному стенді проводиться в два етапи. Перший - це визначення параметрів енергетичного поля, створюваного гідродинамічним кавітатором при різних початкових умовах, тобто при заданих тиску і витраті на вході в гідродинамічний кавітатор. Вибір оптимальних режимів роботи кавітатора, і тоді другий етап - це вивчення впливу енергетичних полів, створюваних гідродинамічним кавітатором, на зниження в'язкості асфальтеносмолопарафінової нафти при роботі кавітатора на оптимальних режимах.

Для визначення синергічної дії енергетичного поля, створюваного гідродинамічним кавітатором, потрібно окремо визначити дію енергетичного поля, а потім як побічних, теплового поля і явища кавітації. Для цих цілей потрібно мати первинні датчики (вимірювальні перетворювачі) - пристрої, які сприймають вимірюваний параметр і перетворюють його у вихідний сигнал (як правило електричний), зручний для передачі по лініях зв'язку на вторинні прилади для подальшого перетворення, реєстрації і обробки, щоб отримати результат у формі вимірної фізичної величини в функції часу.

Інтенсивність ультразвукового поля може бути обчислена за формулою

$$I = 2\pi \cdot A_0^2 \cdot f^2 \cdot \rho \cdot c \quad (3.3)$$

де A_0 - амплітуда змішень, м;

f - частота коливань, c^{-1} ;

ρ - густина середовища, $кг/м^3$;

c - швидкість звуку в цьому середовищі, м/с.

Густина середовища і швидкість звуку в ньому можна взяти табличними або обчислити за відомими формулами.

Також інтенсивність поля, створюваного гідродинамічним кавітатором, можна визначити через добуток побічних величин, користуючись

$$I = \frac{PQ}{S} \quad (3.4)$$

де P - тиск у соплі, Па;

Q - витрати рідини через сопло, $м^3/с$;

S - площа поперечного перерізу сопла, $м^2$.

Значить для вимірювання цих величин потрібно мати на стенді манометри або датчики тиску і витратомір.

Порівнюючи отримані результати, обчислені за формулами 3.3 і 3.4, можна із більшою достовірністю говорити про інтенсивність енергетичного поля, створюваного гідродинамічним кавітатором, і легше визначити оптимальні режими його роботи.

Щоб визначити теплове поле, потрібно вимірювати різницю температур на вході в гідродинамічний кавітатор і на виході з нього. Для цього можна використати скляні рідинні термометри (спиртові або ртутні), електроконтактні термометри типу ТПК з рухомим контактом, також термоелектричні перетворювачі або як їх ще називають термопари типу ТМК (мідь-копель) або типу ТХК (хром-копель). Але при визначенні цих параметрів потрібно враховувати час і об'єм рідини, який нагрівався за даний період часу.

Так як уже відомо, що утворення кавітації залежить і від в'язкості рідини, в якій розповсюджуються коливання, то бажано було б провести дослідження,

використовуючи в якості робочої рідини легку мало в'язку нафту. Тому що для видобування високов'язких нафт уже використовують легку нафту як розчинник. А вивчивши дію гідродинамічного кавітатора, в якому як робочу рідину використовувати мало в'язку нафту при оптимальних режимах роботи, можна добитися значного зниження в'язкості важких асфальтеносмолопарфінових нафт.

3.3 Проведення випробувань на лабораторному стенді та аналіз отриманих результатів

Дослідження проводились на лабораторному стенді, який складається з металевої камери (технічної ємності) для досліджень фізичних полів, створюваних за допомогою гідродинамічного кавітатора; гідравлічна частина стенду була зроблена із замкнутим циклом – робоча рідина подавалась з технічної ємності через насос на гідродинамічний кавітатор і в металеву камеру, звідки через вихідну лінію рідина поверталась в технічну ємність. Для вимірювання температури використовувались скляні спиртові термометри. В якості піддослідної нафти використовували високов'язку нафту з Коханівського родовища.

Для визначення тиску в соплі використали рівняння Бернуллі [73] для двох поперечних січень 1 і 2, проведених в усталеному потоці реальної рідини

$$P_1 + \alpha_1 \frac{\rho \cdot v_{cp1}^2}{2} + \rho \cdot g \cdot z_1 = P_2 + \alpha_2 \frac{\rho \cdot v_{cp2}^2}{2} + \rho g z_2 + \Delta p_{12} \quad (3.5)$$

де P - статичний тиск, Па;

v_{cp} - середня швидкість в даному січенні, рівна відношенню секундної об'ємної витрати до площі січення, м/с;

ρ - густина робочої рідини, кг/м³;

z - висота січення струменю над умовним рівнем, м;

α_1 - поправочний коефіцієнт на нерівномірність розповсюдження швидкості по січенню 1 і 2;

Δp_{12} - втрата тиску між січеннями 1 і 2, зв'язана з роботою сил тертя.

Лабораторними дослідженнями гідродинамічного кавітатора було встановлено характер витікання робочої рідини з кавітатора. Потік, потрапляючи через тангенціальні отвори в камеру закручування, набуває відцентрового прискорення і, витікаючи з великою швидкістю через сопло кавітатора, створює гідроакустичне поле [4].

Експериментально встановлено [18, 74-79], що під дією акустичного поля (ультразвуку) виникають швидкоплинні градієнти тиску і проходить руйнування пограничних шарів рідини, перехід неньютонівської рідини в ньютонівську. При певній інтенсивності поля (понад $0,1 \text{ кВт/м}^2$) більше ніж 50 % акустичної енергії трансформується у тепло. Таким чином, нафта одночасно опромінюється тепловим та акустичним (ультразвуковим) полями (термоакустична дія). У високоінтенсивному акустичному (ультразвуковому) полі виникають, так звані, гравітаційні ефекти, які призводять до випадання механічних домішок, твердого парафіну і солей.

Швидкість поширення ультразвуку в матеріальному середовищі визначається такими його характеристиками, як пружність і густина. Але при підвищенні деякого граничного для даного середовища значення інтенсивності ультразвуку і при переході від поширення коливань малої амплітуди до коливань кінцевої амплітуди в полі ультразвукових коливань все більшу роль починають відігравати нелінійні ефекти. Порушення принципу суперпозиції хвильового процесу призводить до виникнення нових фізичних явищ – тиску випромінювання, акустичних потоків і найважливішого прояву дії потужного ультразвуку на рідину – акустичної кавітації.

Під час кавітації в рідині виникають і ростуть парогазові бульбашки, які нелінійно пульсують і лускаються з утворенням ударних хвиль і кумулятивних струменів. Поширення потужного ультразвуку кінцевої амплітуди в рідині з розвитком кавітаційних явищ супроводжується перебігом ряду фізико-хімічних процесів, які мають велике практичне значення – дегазації, емульгування, коагуляції, диспергування та ін.

Нами було проведено ряд дослідів на лабораторному стенді для визначення інтенсивності ультразвукового поля (рис. 3.1). Результати випробувань зведено в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 - Результати лабораторних випробувань інтенсивності ультразвукового поля, створюваного гідродинамічним кавітатором

Площа поперечного перерізу сопла, $\text{м}^2 \cdot 10^{-6}$	Тиск в нагнітальній лінії, $\text{Па} \cdot 10^6$	Об'єм рідини з сопла кавітатора, $\text{м}^3 \cdot 10^{-3}$	Час, за який витікає даний об'єм рідини, с	Інтенсивність ультразвукового поля, $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot 10^6$
7,06	0,118	0,62	9	1,153
		0,67	10	1,120
		0,74	11	1,121
		0,69	10	1,153
		0,68	10	1,136
7,06	2,06	1,3	7	54,18
		1,6	9	51,64
		1,28	6	62,45
		1,38	7	57,49
4,15	6,81	0,86	6	234,26
		0,99	6	270,36
		0,96	6	262,87
		0,98	6	266,95

Високов'язка нафта Коханівського родовища поміщалася в контейнер і після цього піддавалася обробці гідроакустичним полем, створеним кавітатором. Внаслідок чого в'язкість нафти з 147 мПа·с знизилась до 18 мПа·с. В той самий час температура обробленої нафти підвищилась з 15 °С до 58 °С за півгодини.

Інтенсивність ультразвукового поля визначається [10] за формулою

$$I = P \cdot \nu \quad (3.6)$$

де P - тиск в нагнітальній лінії, Па;

ν - швидкість витікання рідини з сопла, м/с;

$$\nu = \frac{Q}{S} \quad (3.7)$$

де Q - витрати рідини через сопло кавітатора, м³/с;

S - площа поперечного перерізу сопла, м²;

$$Q = \frac{V}{t} \quad (3.8)$$

де V - об'єм рідини, яка витікає із сопла кавітатора, м³;

t - час, за який витікає даний об'єм рідини, с.

Результати дослідів свідчать про те, що гідродинамічний кавітатор позитивно впливає на зниження в'язкості високов'язкої нафти. Це робить можливим його застосування в технологічній схемі під час піднімання високов'язких нафт із свердловин на денну поверхню.

3.4 Удосконалення конструкції гідродинамічного кавітатора за результатами досліджень

Враховуючи результати проведених лабораторних випробувань, а саме те, що потрібно збільшити пульсуючу дію рідини великої інтенсивності з періодичною зривною кавітацією і при малих витратах робочої рідини. Для цього використовуємо конусоподібну вихрову камеру з тангенціальними каналами але з внутрішньою поверхнею корпусу, виконаною у вигляді гвинтової поверхні для більшого закручення потоку рідини. Щоб отримувати збільшення інтенсивності генеруючого поля та створення сприятливих умов для виникнення кавітації з швидким лусканням кавітаційних каверн, нами запропоновано дифузор із ступінчатими гострими кромками і кутом розкриття більше 30⁰.

Для зменшення витрат робочої рідини потрібно зменшити діаметр сопла критичної частини. Оскільки ця величина гранична і залежить від очищення робочої рідини (практично використовуються фільтри з діаметрами більшими як 2,5 мм), то діаметр сопла можна брати не менше 3 мм, бо сопло може засмітитися піском, окалиною і т. п. шламом, який проскочить через фільтр. Схема гідродинамічного кавітатора показана на рис. 3.3. і його фотографія на рис. 3.4

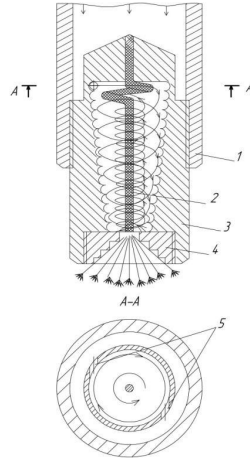


Рисунок 3.3 – Схема гідродинамічного кавітатора:
 1 – патрубок; 2 – пружинний стержень; 3 – циліндричний корпус;
 4 – ступінчастий дифузор; 5 – тангенціальні вхідні канали

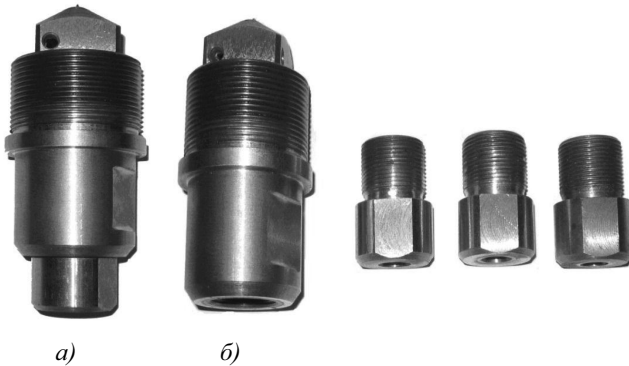


Рисунок 3.4 – Фотографія гідродинамічного кавітатора
 а) в зібраному вигляді; б) з різними діаметрами сопел

Нами запропоновано використовувати дифузор з діаметром сопла критичної частини більше 3 мм, а також пружинний стержень меншого діаметру ніж діаметр сопла, що буде створювати кільцеву щілину з площею поперечного перерізу приблизно рівною критичному. Наявність пружинного стержня ініціює утворення спіралеподібного вихрового шнура, який обертаючись навколо стержня, деформує периферійний потік, викликаючи в ньому періодичні пульсації швидкості і тиску, що призводить до збільшення інтенсивності генеруючого поля.

Нами розроблена конструкція такого кавітатора (рис. 3.3), подана заявка до Держпатенту України на винахід "Гідродинамічний кавітатор" і отримано позитивне рішення про видачу деклараційного патенту [80].

3.5 Проведення стендових випробувань гідродинамічного кавітатора удосконаленої конструкції

Для дослідження роботи гідродинамічного кавітатора удосконаленої конструкції та його вплив на підготовлену товарну нафту (ПТН) на базі нафтогазовидобувного управління «Долинанафтогаз» за розробленою програмою методикою було проведено експериментальні випробування другого етапу [81, 82] з метою визначення :

- впливу пульсацій тиску, які створюються, на процес зниження в'язкості нафти з метою інтенсифікації видобування високов'язкої нафти;
- частоти і амплітуди пульсацій тиску на виході з гідродинамічного пристрою- кавітатора.

Виходячи з поставленої мети експериментальних досліджень щодо створення пульсацій тиску в робочій рідині за допомогою гідродинамічного кавітатора, нами задіяно стендову експериментальну установку (рис. 3.5)



Рисунок 3.5 – Загальний вигляд стендової експериментальної установки
Дослідження проводилися згідно з нижче наведеною схемою (див. рис. 3.6).

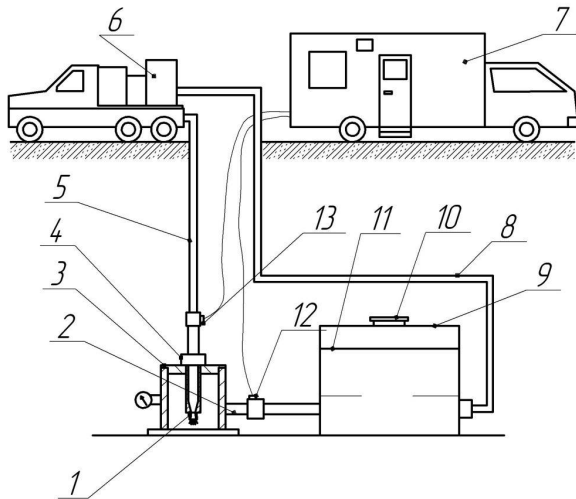


Рисунок 3.6 – Схема обв'язки стендової експериментальної установки при проведенні досліджень роботи гідродинамічного кавітатора удосконаленої конструкції:

1 – гідродинамічний кавітатор; 2 – шток; 3 – корпус експериментальної установки; 4 – контргайка; 5 – нагнітальна лінія; 6 – насосний агрегат; 7 – станція контролю і керування EC-22-ACD; 8 – викидна лінія; 9 – ємність для нафти; 10 – горловина ємності; 11 – нафта; 12 – контрольний датчик тиску на виході з установки; 13 – контрольний датчик тиску на вході в установку

Підготовлена товарна нафта 11 подається через шток 2 від насосного агрегату 6 типу 4АН-700, проходить через гідродинамічний пристрій- кавітатор

1 і спрямовується у ємність 9. Із ємності нафта прямує у викидну лінію 8 і знову повертається у насос. Тиск на вході і на виході в установку фіксується в автономному режимі через датчики тисків 13, 12 із записом їх показників на комп'ютері станції контролю і керування ЕС-22-ACD 7.

Послідовність проведення операцій була такою:

1. Напомпували в сталеву ємність 1 м³ підготовленої товарної нафти (ПТН).
2. Провели вимірювання вихідних показників товарної нафти: температури, в'язкості, густини.

3. Обв'язали дослідну установку з насосним агрегатом, ємністю з нафтою і станцією контролю і керування ЕС-22-ACD.

4. Провели прокачування ПТН з тиском 7 МПа на насосному агрегаті упродовж 10 хвилин через дослідну установку і ємність без встановлення у шток установки гідродинамічного пристрою- кавітатора.

5. Зупинили роботу насоса. Провели вимірювання показників нафти: температури, густини і в'язкості.

6. Встановили у дослідній установці гідродинамічний кавітатор з діаметром комбінованого сопла спочатку 8 мм, а пізніше 6 мм та почали прокачування ПТН упродовж 10 хвилин і фіксували тиск на вході і на виході з установки.

7. Зупинили роботу насоса, відібрали із сталеві ємності пробу ПТН і провели вимірювання показників нафти: температуру, в'язкість, густину.

Прокачування ПТН через дослідну установку з гідродинамічним кавітатором тривали близько однієї години. З інтервалом 10 хв. зупиняли роботу насоса, відбирали проби нафти і проводили вимірювання її показників: температури, густини і в'язкості.

Усього було відібрано сім проб. Необхідно відзначити, що дослідження проводились при температурі повітря – 6 °С, швидкості вітру 8-12 м/с і атмосферних опадах у вигляді снігу.

Вихідні параметри нафти: температура - 14 °С; густина $\rho = 849$ кг/м³; кінематична в'язкість $\nu = 18,52$ мм²/с, статична напруга зсуву через одну і десять хвилин становила $\tau = 2,0/2,5$ дПа.

В результаті проведених експериментальних досліджень були отримані такі результати (див. табл. 3.2).

Таблиця 3.2 – Результати досліджень впливу роботи гідродинамічного кавітатора на параметри нафти

Тип пристрою	Тиск на вході в установку $P_{вх}$, МПа	Тиск на виході з установки $P_{вих}$, МПа	Час нагнітання робочої рідини, хв.	Параметри нафти			
				ρ , кг/м ³	ν , $\times 10^{-6}$ м ² /с	t , °С	СНЗ, 1/10 дПа
Без гідродинамічного кавітатора	4,0-5,3	0,01	10	854	28,946	12	2,5/3,5
Гідродинамічний кавітатор з діаметром комбінованого сопла 8 мм	4,6-7,0	0,21-0,24	10	846	8,23	16	1,0/1,0
				839	7,65	20	1,0/1,0
Гідродинамічний кавітатор з діаметром комбінованого сопла 6 мм	2,1-8,3	0,21-0,28	10	835	7,44	25	1,0/1,0
				830	7,23	29	1,0/1,0
				824	6,95	34	1,0/ 1,0

Необхідно відзначити, що під час прокачування нафти упродовж 10 хвилин без встановлення у штук дослідної установки гідродинамічного кавітатора температура нафти знизилась на 2 °С, а густина, кінематична в'язкість і СНЗ

(1/10) відповідно збільшились і становили $\rho=854 \text{ кг/м}^3$ і $\nu=28,946 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ і $\text{СНЗ} = 2,5/3,5$ дПа (див.табл. 3.2). Пульсацій на виході з установки не спостерігалось (див. рис. 3.7). Після встановлення гідродинамічного кавітатора у шток установки і відновлення прокачування нафти згідно з наведеною схемою температура нафти почала зростати на 4 – 5 °С через кожні 10 хвилин, а густина знижуватися відповідно на 4-8 одиниць і 2-3 %. Необхідно підкреслити, що після першого прокачування через гідродинамічний кавітатор кінематична в'язкість знизилась більше ніж на 20 одиниць (в кінцевому результаті кінематична в'язкість зменшилась в 4,16 рази). Статична напруга зсуву через 1 хв. зменшилась на 1,5 дПа, а через 10 хв. – на 2,5 дПа і становила 1,0 дПа і залишалася стабільною до кінця проведення експерименту.

За результатами стендових експериментальних досліджень складено акт (додаток В), в якому було відмічено, що гідродинамічний кавітатор є безпечним в екологічному відношенні і може бути використаний, як засіб для зниження в'язкості нафти у вибійних умовах у складі комплексу обладнання для видобування із свердловин високов'язкої нафти з вмістом асфальтенів, смол і парафінів.

Частота коливань під час роботи гідродинамічного кавітатора як видно з рисунків 3.8-3.9 становила 10-12 Гц, а амплітуда коливань при роботі з комбінованим соплом діаметром 8 мм складала на вході в установку 4,6-7,0 МПа, а на виході 0,21-0,24 МПа, а з комбінованим соплом діаметром 6 мм відповідно 2,1-8,3 МПа і 0,21-0,28 МПа.

Для порівняння наводимо результати досліджень показників нафти (в'язкість, СНЗ) (додаток Д) після її нагрівання до відповідних температур, які проводилися разом з фахівцями НДПІ ПАТ «Укрнафта» (див. табл. 3.3).

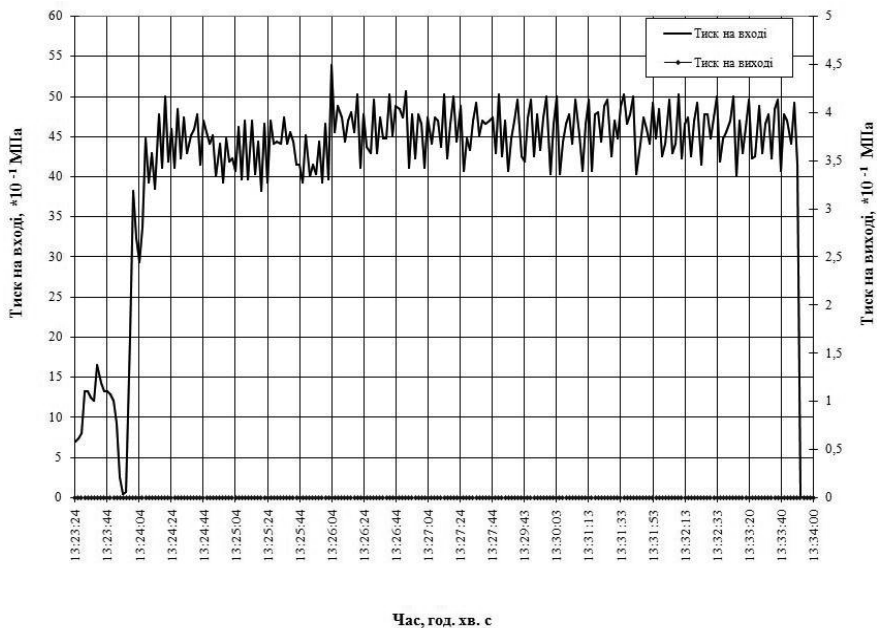


Рисунок 3.7 – Графічна інтерпретація результатів дослідження роботи установки без гідродинамічного кавітатора (кавітатора) при прокачуванні нафти

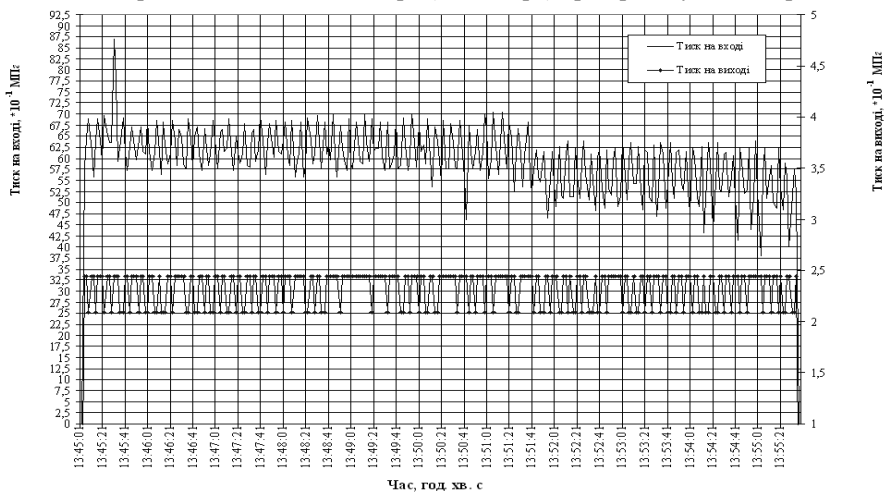


Рисунок 3.8 – Графічна інтерпретація результатів дослідження гідродинамічного кавітатора з діаметром комбінованого сопла 8 мм при прокачуванні нафти

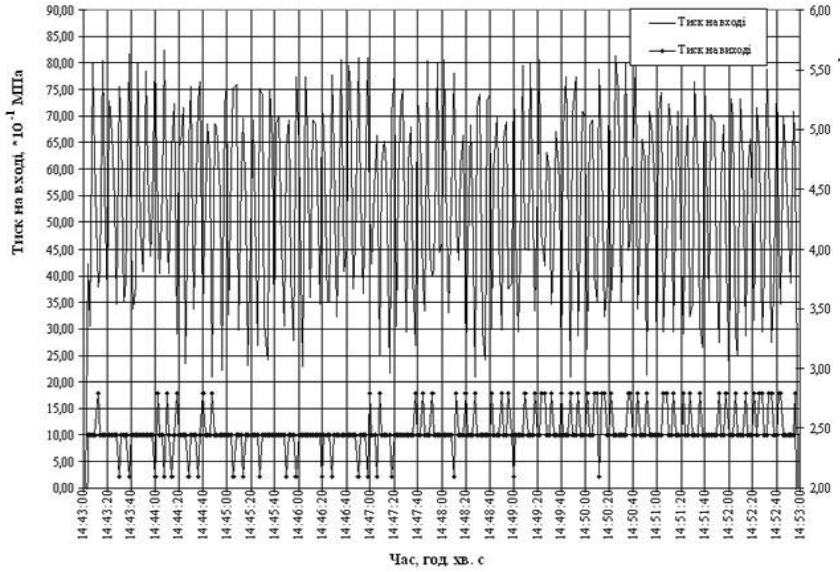


Рисунок 3.9 – Графічна інтерпретація результатів дослідження гідродинамічного кавітатора з діаметром комбінованого сопла 6 мм при прокачуванні нафти

Таблиця 3.3 – Результати дослідження нафти зі свердловин Долинського родовища

№ з/п	Показник	Одиниця виміру	№ свердловини		
			833	751	825
1.	Температура застигання	°С	21	27	20
2.	Густина товарної нафти	кг/м ³	848	863	849
3.	В'язкість кінематична при 25 °С при 29 °С при 34 °С при 40 °С	м ² /с x10 ⁻⁶	27,996 15,026 8,193 7,934	- 36,874 16,229 11,562	17,88 10,448 7,224 5,914
4.	Статична напруга зсуву через 1/10 хв. при 25 °С при 29 °С при 34 °С при 40 °С	дПа	1,0/1,0 2,0/2,0 1,0/1,0 1,0/1,0	2,0/2,0 2,5/1,0 1,0/1,5 1,0/1,0	1,0/1,0 2,0/2,0 1,0/1,5 1,0/1,0

В табл. 3.4-3.6 наведені результати аналізу нафти, проби яких відбиралися зі свердловин № 833, № 751 і № 825 Долинського родовища. Аналіз проб нафти проводився фахівцями НДПІ ПАТ «Укрнафта».

Таблиця 3.4 - Результати аналізу проб нафти зі свердловини № 833 Долинського родовища

№ з/п	Назва показника	Одиниця виміру	Результат
1.	Густина	кг/м ³	848,8
2.	В'язкість кінематична при 50 °С	мм ² /с	6,427
3.	Температура застигання	°С	21
4.	Фракційний склад: початок кипіння	°С	88
	до 100 °С відганяється об'ємна частка	%	2
	до 120 °С відганяється об'ємна частка	%	4
	до 150 °С відганяється об'ємна частка	%	9
	до 160 °С відганяється об'ємна частка	%	10
	до 180 °С відганяється об'ємна частка	%	14
	до 200 °С відганяється об'ємна частка	%	17
	до 220 °С відганяється об'ємна частка	%	21
	до 240 °С відганяється об'ємна частка	%	25
	до 260 °С відганяється об'ємна частка	%	31
	до 280 °С відганяється об'ємна частка	%	38
	до 300 °С відганяється об'ємна частка	%	43
	до 350 °С відганяється об'ємна частка	%	60
5.	Коефіцієнт світлопоглинання		174,6
6.	Температура плавлення парафіну	°С	58
7.	Масова частка парафінів	%	8,80
8.	Масова частка сірки	%	0,31
9.	Масова частка селікагелевих смол	%	8,52
10.	Масова частка асфальтенів	%	0,7
11.	Масова частка води	%	38,90

Таблиця 3.5 - Результати аналізу проб нафти зі свердловини № 751 Долинського родовища

№ з/п	Назва показника	Одиниця виміру	Результат
1.	Густина	кг/м ³	863,0
2.	В'язкість кінематична при 50 °С	мм ² /с	8,843
3.	Температура застигання	°С	27
4.	Фракційний склад: початок кипіння	°С	72
	до 100 °С відганяється об'ємна частка	%	4
	до 120 °С відганяється об'ємна частка	%	6
	до 150 °С відганяється об'ємна частка	%	10
	до 160 °С відганяється об'ємна частка	%	12
	до 180 °С відганяється об'ємна частка	%	13
	до 200 °С відганяється об'ємна частка	%	16
	до 220 °С відганяється об'ємна частка	%	20
	до 240 °С відганяється об'ємна частка	%	24
	до 260 °С відганяється об'ємна частка	%	30
	до 280 °С відганяється об'ємна частка	%	37
	до 300 °С відганяється об'ємна частка	%	50
	до 350 °С відганяється об'ємна частка	%	68
5.	Коефіцієнт світлопоглинання		170,6 0
6.	Температура плавлення парафіну	°С	55
7.	Масова частка парафінів	%	11,90
8.	Масова частка сірки	%	0,32
9.	Масова частка селікагелевих смол	%	11,19
10.	Масова частка асфальтенів	%	0,5
11.	Масова частка води	%	21,25

Таблиця 3.6 - Результати аналізу проб нафти зі свердловини № 751 Долинського родовища

№ з/п	Назва показника	Одиниця виміру	Результат
1.	Густина	кг/м ³	849,6
2.	В'язкість кінематична при 50 °С	мм ² /с	6,262
3.	Температура застигання	°С	20
4.	Фракційний склад: початок кипіння	°С	73
	до 100 °С відганяється об'ємна частка	%	4
	до 120 °С відганяється об'ємна частка	%	8
	до 150 °С відганяється об'ємна частка	%	12
	до 160 °С відганяється об'ємна частка	%	14
	до 180 °С відганяється об'ємна частка	%	18
	до 200 °С відганяється об'ємна частка	%	21
	до 220 °С відганяється об'ємна частка	%	26
	до 240 °С відганяється об'ємна частка	%	30
	до 260 °С відганяється об'ємна частка	%	34
	до 280 °С відганяється об'ємна частка	%	39
	до 300 °С відганяється об'ємна частка	%	44
	до 350 °С відганяється об'ємна частка	%	60
5.	Коефіцієнт світлопоглинання		163,70
6.	Температура плавлення парафіну	°С	54
7.	Масова частка парафінів	%	9,93
8.	Масова частка сірки	%	0,32
9.	Масова частка селікагелевих смол	%	8,6
10.	Масова частка асфальтенів	%	1,0
11.	Масова частка води	%	60,70

3.6 Аналіз результатів дослідження

В результаті проведення стендових випробувань було зафіксовано залежність політропи нафти від температури (рис. 3.10). Необхідно відмітити, що найбільш інтенсивне залежність зміни показника політропи нафти від часу її обробки гідродинамічним кавітатором в межах температур від 16 °С до 34 °С, яка показала, що після 30 °С наступає її стабілізація. Тобто це свідчить про те, що завдяки такій обробці відбувається перехід нафти від стану неньютонівської до ньютонівської рідини і подальша обробка нафти буде малоефективною і недоцільною.

Проводячи аналіз залежності тиску на виході з установки від часу роботи гідродинамічного кавітатора (рис. 3.11) виявлено якісну зміну стану середовища в умовах існування фазового переходу, який триває впродовж від 200 до 400 секунд від початку впливу відцентрової сили.

Аналізуючи залежність зростання температури нафти від часу роботи гідродинамічного кавітатора (рис. 3.12), можна зробити висновок, що ця залежність носить степеневий характер.

На рис. 3.13 відображена залежність густини нафти від часу роботи гідродинамічного кавітатора. Впродовж роботи кавітатора (із зупинками до 5 хв. для відбору проб нафти) густина нафти знизилась з 854 до 824 кг/м³.

На рис. 3.14 показана залежність в'язкості нафти від часу обробки її гідродинамічним кавітатором. Інтенсивне зниження в'язкості високов'язкої нафти відбувається з перших секунд роботи гідродинамічного кавітатора, який створюючи знакозмінні коливання тиску, руйнує механічну структуру нафти, що сприяє збільшенню швидкості її відкачування із свердловин глибиною до 2000 м.

На рис. 3.15 зображена динаміка зміни в'язкості нафт Долинського родовища від температури. Порівнюючи з нафтою, яка була оброблена гідродинамічним кавітатором, стає очевидним, що її в'язкість при фіксованих температурах має нижчі показники, в окремих випадках у два рази. Практично нафта, оброблена гідродинамічним кавітатором, при температурі 16 °С має таку ж в'язкість, як звичайно нагріта нафта до 34 °С Долинського родовища.

На рис. 3.16 показана залежність в'язкості обробленої нафти від часу, який пройшов після проведення експерименту. Через 4-5 годин після обробки досліджуваної нафти гідродинамічним кавітатором її в'язкість знову повільно збільшується. Це явище підтверджується дослідженнями Сургучова М.Л., Кузнєцова О.Л., Сімкіна Е.М. та Вахітова Г.Г.

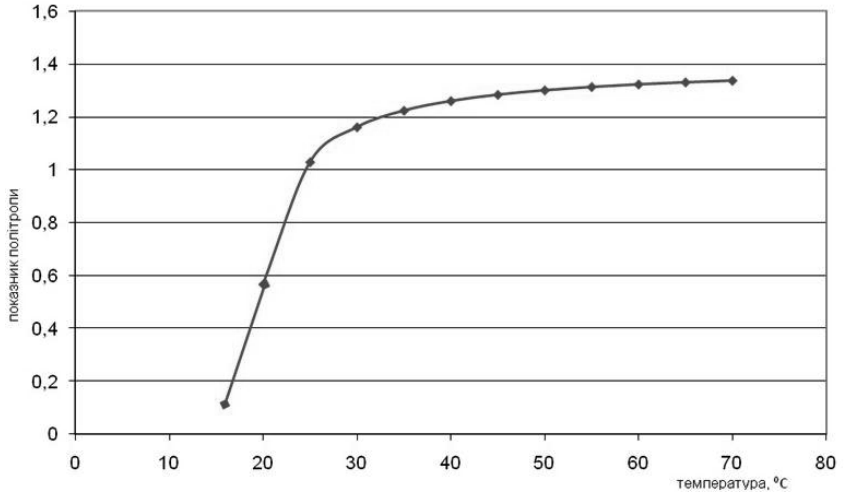


Рисунок 3.10 – Залежність показника політропи нафти від температури

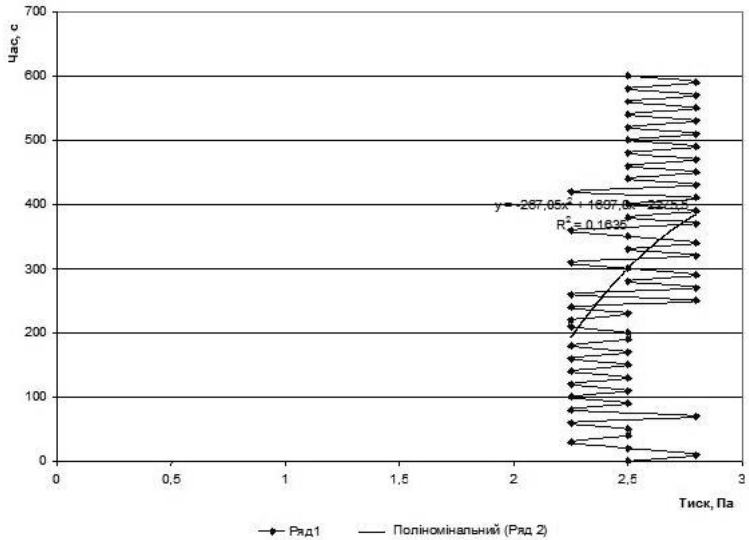


Рисунок 3.11 – Залежність тиску на виході з установки від часу роботи гідродинамічного кавітатора

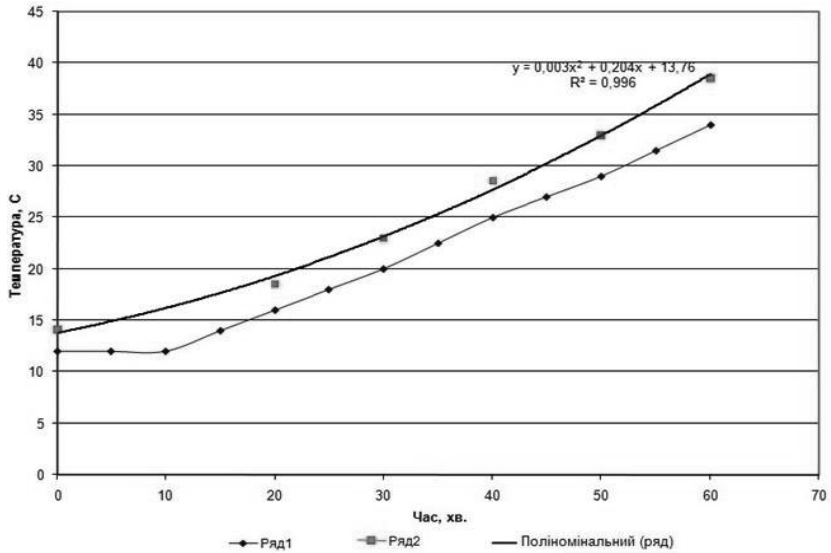


Рисунок 3.12 – Залежність зростання температури нафти від часу роботи гідродинамічного кавітатора

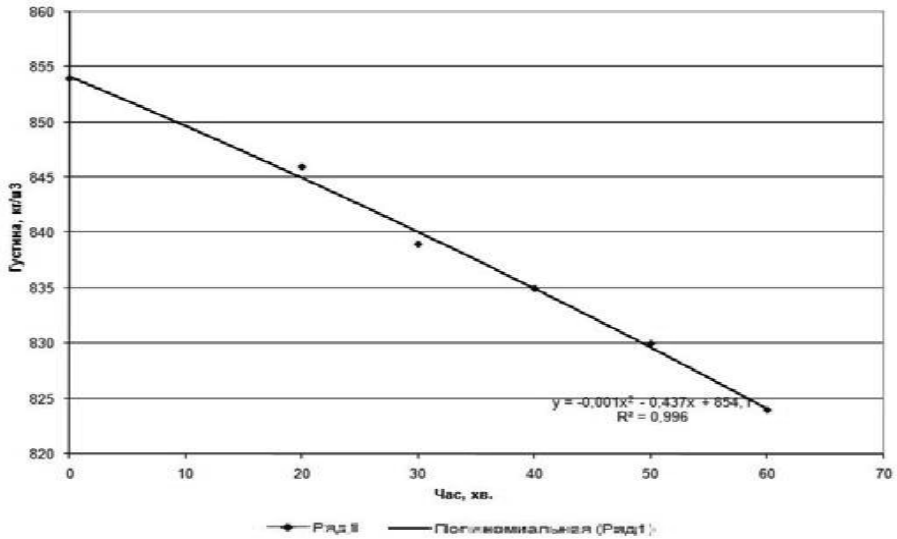


Рисунок 3.13 – Залежність густини нафти від часу роботи гідродинамічного кавітатора

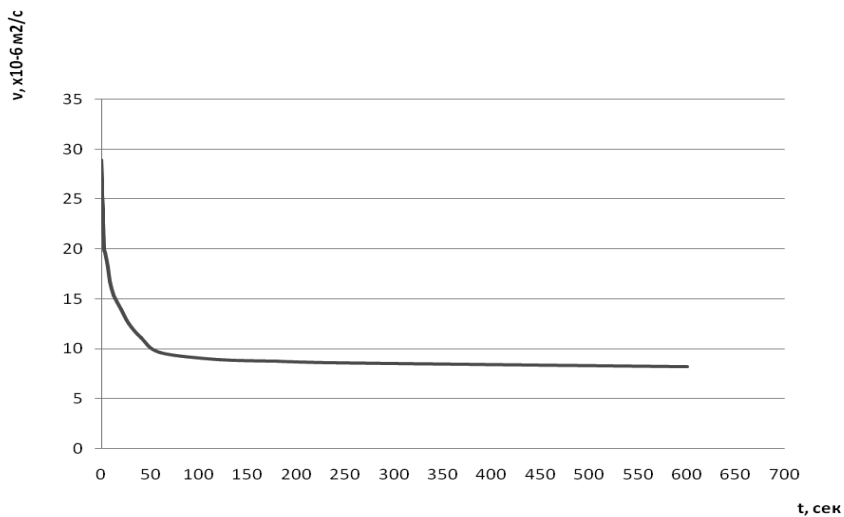


Рисунок 3.14 – Залежність кінематичної в'язкості нафти від часу обробки гідродинамічним кавітатором

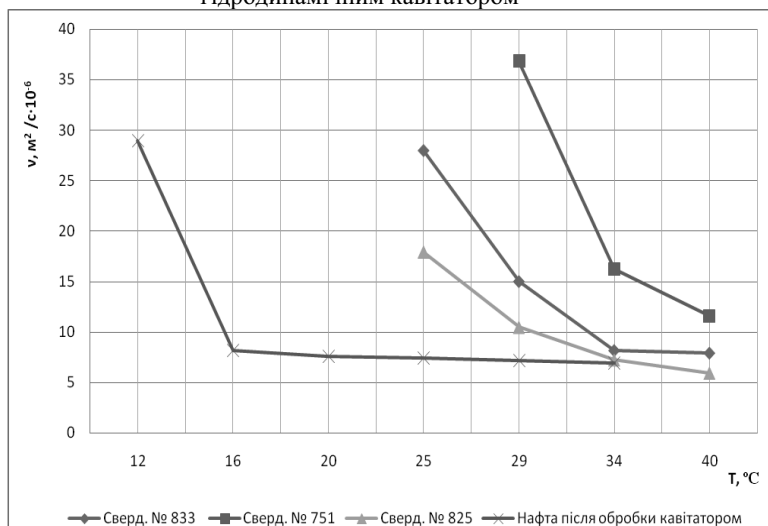


Рисунок 3.15 – Динаміка зміни в'язкості нафти Долинського родовища при нагріванні

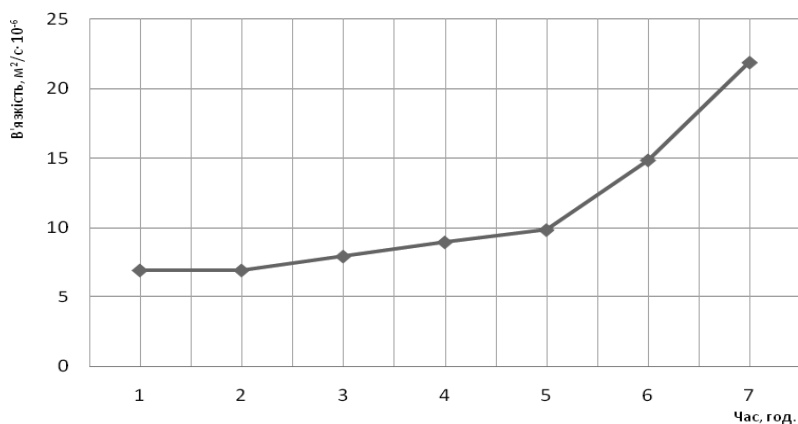


Рисунок 3.16 – Залежність в'язкості нафти від часу після проведення її обробки гідродинамічним кавітатором

Підбиваючи підсумки проведених лабораторних досліджень і стендових випробувань можна стверджувати, що в потоці робочої рідини при її проходженні через гідродинамічний кавітатор виникають пульсації і кавітаційні процеси. Нами встановлено характер пульсації потоку, який полягає у зменшенні величин тиску на виході з пульсаційної камери з частотою 10-12 Гц, а амплітуда коливань при роботі з комбінованим соплом діаметром 8 мм становить на вході в установку 4,6-7,0 МПа, а на виході 0,21-0,24 МПа, а з комбінованим соплом діаметром 6 мм відповідно 2,1-8,3 МПа і 0,21-0,28 МПа. Також зафіксовано якісну зміну стану середовища впродовж 200 секунд (в інтервалі часу від 200 до 400 секунд від початку впливу відцентрової сили). Визначено раціональне використання підведеної енергії для збільшення внутрішньої енергії в'язкої нафти на основі зміни показника політропи пульсаційно-кавітаційного процесу (від 0,1 до 1,3).

Слід зазначити, що зниження в'язкості високов'язкої нафти відбувається з перших секунд роботи гідродинамічного кавітатора, який створюючи знакомінні коливання тиску, руйнує механічну структуру високов'язкої нафти, що сприяє збільшенню швидкості її відкачування із свердловин глибиною до 2000 м.

Також було зафіксовано, що впродовж 4-5 годин після закінчення обробки

досліджуваної високов'язкої нафти гідродинамічним кавітатором її в'язкість знову повільно зростає і набуває початкових значень і навіть перевищує їх. Це явище підтверджується дослідженнями Сургучова М.Л., Кузнцова О.Л. та Сімкіна Е.М.

РОЗДІЛ 4

ПРОМИСЛОВІ ВИПРОБУВАННЯ КОМПЛЕКТУ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ВИДОБУВАННЯ ВИСОКОВ'ЯЗКИХ НАФТ

На сьогоднішній день відома низка свердловинних насосних установок і пристроїв для відкачування рідини із свердловини із використанням струминних насосів і застосуванням аерування робочої рідини [83-90]. Деякі з них мають на меті піднімання на поверхню рідин, які не володіють високов'язкими властивостями. Заслугує на увагу пристрій для видобування високов'язкої і парафінистої нафти.

Недоліком цього винаходу є те, що реагент, який використовується для ініціювання хімічної реакції з виділенням тепла є недешевим і через деякий час його необхідно буде поновлювати. А для цього необхідно буде зупинити видобування і зворотним промиванням або за допомогою канатної техніки піднімати реакційну камеру на поверхню. Все це незадовільно відобразиться на ефективності видобування високов'язкої нафти, погіршить економічні показники роботи свердловини.

Для зменшення впливу цих недоліків нами пропонується удосконалити технологію видобування високов'язких нафт шляхом застосування струминних насосів з розділеними робочими потоками і використанням енергії пульсуючих потоків.

4.1 Склад комплекту обладнання для видобування високов'язких нафт

При проектуванні комплекту обладнання для видобування високов'язких нафт була взята за основу уже відома і випробувана конструкція струминного апарату типу ПЕОС. Нами запропоновано струминний апарат, схему якого зображено на рис. 4.1.

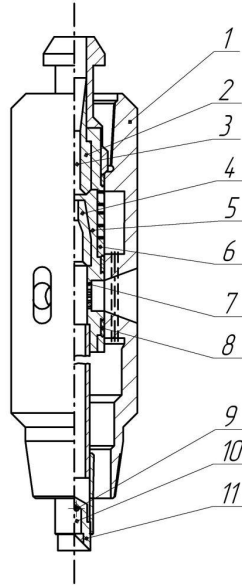


Рисунок 4.1 – Струминний апарат для видобування високов’язких нафт:

1 – корпус пристрою; 2 – дифузор; 3 – камера змішування; 4 – сопло;

5 – сідло; 6 - струминний насос; 7 – фільтраційні отвори;

8 – ущільнюючі кільця; 9 - тангенціальні входні отвори кавітатора;

10 – камера завихрення; 11 – корпус гідродинамічного кавітатора

Корпус пристрою має осьовий канал з мінімальним діаметром 48 мм, який для заданого технологічного процесу перекривається відповідною вставкою (клапаном для опресування пакера, насосом ежекторним з клапаном гідродинамічних досліджень або гідродинамічним кавітатором). В корпусі пристрою є також радіальні канали для подачі робочої рідини і бокові канали вздовж осі для всмоктування пластової рідини з підпакерної зони. У верхній і нижній частинах корпус пристрою має різьбу НКТ 73 ГОСТ 633-80 для з’єднання з насосно-компресорними трубами.

В струминних апаратах типу ПЕОС робоча рідина подається по трубах НКТ, а за технологією видобування високов’язких нафт робоча рідина подається по затрубному просторі, тому насос ежекторний нами конструктивно змінений.

При проектуванні струминного апарату нами були використані напрацювання г/т № 101/95 «Розробка та вдосконалення комплексу обладнання для видобутку високов'язких нафт» та держбюджетних тематик № Д4-98-Ф і № Д2-01-Ф у науково-дослідному інституті нафтогазових технологій Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. Він складається з корпусу, в якому вгвинчені сопло і змішувач. В корпусі насосу передбачені радіальні отвори діаметром не більше 2,5 мм для фільтрації як робочої суміші, так і для фільтрації пластової рідини. Цим забезпечується більш надійніша і довговічніша робота струминного апарату. Сопло (6 і 8 мм) і змішувач виконані двох типорозмірів, що дає можливість підбирати різні режими роботи. Тому діаметр сопла кавітатора виготовляється також двох типорозмірів 6 і 8 мм для забезпечення стабільної роботи гідравлічної пари струминний насос – кавітатор. Під час стендових досліджень кращі результати показав кавітатор з діаметром сопла 6 мм. В загальному чим менший діаметр – тим інтенсивнішою буде кавітація, але ця величини обмежується розміром вічок поверхневого фільтра, який становить 2,5 мм. В конструкції кавітатора передбачено центральний пружинний стержень, торець якого межує з соплом. Діаметр стержня становить 1 мм. Отже, якщо сопло кавітатора має 6 мм, а в центрі його знаходиться пружинний стержень діаметром 1 мм, то тоді прохідний канал між стержнем і соплом становитиме з кожного боку 2,5 мм. Звідси випливає, що використовувати сопло кавітатора з діаметром, який менший 6 мм не можна.

У верхній частині ежекторного насосу знаходиться хвостовик з проточкою, за яку при допомозі цангового вловлювача на канатній техніці можна підняти його на поверхню. В нижній частині ежекторного насосу є різьбова частина, до якої можна приєднувати клапан гідродинамічних досліджень або гідродинамічний кавітатор.

Клапан для гідродинамічних досліджень складається з корпусу, в якому знаходиться сідло, з'єднане з обмежуючою втулкою, кулька діаметром 25 мм притиснена пружиною до сідла і обмежуючий гвинт. Сідло в нижній частині

з'єднане з наконечником, який підтримує ущільнюючі манжети. В наконечнику передбачена різьба для приєднання глибинного манометра або термометра.

В комплект обладнання входить також клапан для опресування пакера. Він складається з корпусу послідовно з'єданого з вставкою, муфтою наконечником і хвостовиком. Між ними знаходяться ущільнюючі манжети. Корпус, вставка, муфта, наконечник і хвостовик мають осьовий канал, тому цей клапан можна використовувати для заливання кислоти, лугу або ПАР у підпакерну зону.

Для проведення технологічних операцій на свердловині (заміна вставок) в комплект обладнання включено перехідник для з'єднання з геофізичним кабелем; обважнювач і вловлювач цанговий.

4.2 Методика визначення технологічних параметрів роботи свердловинної установки

Експлуатація свердловин з високим газовим фактором і відносно низькими вибійними тисками (при підніманні високов'язких нафт для забезпечення притоку нафти з пласта необхідно створити великі депресії на пласт, а значить створювати низькі вибійні тиски) представляє значні інженерні труднощі. Фонтанний спосіб не реалізується через недостачу природної енергії пласта, механізовані - економічно малоефективні і газліфтний - через високі питомі витрати газу, насосні - через низький коефіцієнт корисної дії та інші фактори.

Враховуючи те, що із застосуванням струминних апаратів можна досягти при певних умовах ефекту фонтанування, нижче розглянуто ці умови, які можуть забезпечити цей ефект. При цьому можуть мати місце два випадки:

- 1) відбір рідини з свердловин обмежений;
- 2) відбір рідини з свердловин необмежений.

Для випадку, коли необхідно проектувати процес підйому нафти з обмеженим відбором, розрахунок приведено нижче. Для необмеженого відбору необхідне вирішення додаткових задач.

Вихідні дані, технологічні параметри: послідовність їх визначення для варіанту, коли в якості робочої рідини використовується легка нафта, а робочий тиск надземної силової установки не задається.

Визначення технологічних параметрів роботи свердловинної установки являє собою рішення прямої задачі, а далі – зворотної.

Для визначення технологічних параметрів ми опиралися на роботи таких вчених: Баскієва К.С., Гіматутдінова Ш.К., Бойка В.С., Савенкова І.Г., Міщенко І.Т., Соколова Е.О., Зінгера М.М., Шурова В.І., Аметова І.М., Яремійчука Р.С., Качмара Ю.Д., Світлицького В.М. та ін. [91-105].

4.3 Визначення витрат робочої рідини і подачі струминного апарату

Відбір рідини з свердловини, виходячи з конкретних умов, є обмеженим. Таким чином, відомий дебіт свердловини Q_n і аналітичний вираз індикаторної

$$Q_n = f(P_a) \quad (4.1)$$

Знаючи Q_n , витрату надземної силової установки або витрату робочої рідини визначаємо з співвідношення:

$$Q_p = \frac{Q_n}{i} B \quad (4.2)$$

де Q_n - дебіт свердловини, м³/с·Па;

i - коефіцієнт інжекції струминного апарату;

$$B = \frac{\rho_n + G_0 \rho_{zo}}{\rho_p}, \quad (4.3)$$

де ρ_n - густина нафти, кг/м³;

G_0 - газовий фактор, приведений до нормальних умов, м³/м³;

ρ_{zo} - густина газу, приведена до нормальних умов, кг/м³;

ρ_p - густина робочої рідини, кг/м³.

Коефіцієнтом інжекції i задаються, виходячи з умов забезпечення найбільш ефективної роботи установки. Сумарна подача струминного апарату буде дорівнювати

$$Q_c = Q_n + Q_p, \quad (4.4)$$

де Q_p - витрата робочої рідини, м³/с.

Знаючи дебіт свердловини Q_n , вибійний тиск визначається із рівняння припливу

$$p_e = P_{nl} - \left(\frac{Q_n}{k_0} \right)^h, \quad (4.5)$$

де P_{nl} - пластовий тиск, Па;

k_0 - коефіцієнт продуктивності свердловини або постійний коефіцієнт в рівнянні припливу, м³/Па·с;

$h = 1$ - показник ступеню.

За вибійним тиском p_e , тиском насичення нафти газом $p_{нас}$ і умов експлуатації свердловини, тиск на прийомі струминного апарату P_n визначається, виходячи з таких міркувань, якщо

$$p_e > p_{нас}, \text{ то } P_n = p_{нас} \quad (4.6)$$

У випадку, коли $p_e < p_{нас}$, то тиск на прийомі насосу приймають рівним вибійному

$$P_n = p_e \quad (4.7)$$

Знаючи глибину свердловини, вибійний тиск і тиск біля струминного апарату, визначається глибина його спуску в свердловину за залежністю

$$L = H - \frac{p_e - P_n}{\rho_n g}, \quad (4.8)$$

де H - глибина свердловини до середніх отворів фільтра, м;

g - прискорення вільного падіння, м/с².

В нашій схемі робоча рідина подається до струминного апарату через кільцевий міжтрубний простір.

Найбільш важливим параметром, від якого, в основному, залежать всі робочі параметри силової установки, є тиск на викиді струминного апарату p_c . Його значення, при умові, коли $p_{нас}$ і α' відомі, визначається за таким рівнянням

$$p_c = \frac{i \cdot G_0}{\alpha' (i + B)} + (L - L') \rho_c g + \frac{8 \lambda_k (L - L') Q_n^2 (i + B)^2 \rho_c}{\pi^2 (D_6^2 - d_3^2) \cdot (D_6 - d_3) \cdot i^2 \cos \phi}, \quad (4.9)$$

де α - коефіцієнт розчинності газу в нафті, м³/м³·Па;

α' - коефіцієнт аналогічний коефіцієнту розчинності газу в рідині і приблизно враховує особливості розчинення та виділення газу у висхідному потоці підйомника, м³/м³·Па і визначається за виразом

$$\alpha' \approx \frac{2\alpha i}{2i + B}, \quad (4.10)$$

ρ_c - густина суміші свердловинної і робочої рідини, що виходять з струминного апарату, кг/м³;

ϕ - кут нахилу свердловини ;

L' - довжина верхньої частини підйомника, з якої можливий процес фонтанування рідини;

$$L' = \frac{\frac{iG_0}{\alpha'(i+B)} - P_2}{2\rho_c g} + \sqrt{\left(\frac{\frac{iG_0}{\alpha'(i+B)} - P_2}{2\rho_c g} \right)^2 + \frac{L \left[\frac{iG_0}{i+B} - \alpha'(P_2 - P_0) \right] D_6^{0.5} \left[\frac{iG_0}{\alpha'(i+B)} - P_2 \right]}{2,77 \cdot 10^{-4} \rho_c^2}} \ln \frac{iG_0}{\alpha'(i+B)P_2} \quad (4.11)$$

P_2 - тиск на викиді свердловини, Па;

P_0 - атмосферний тиск, Па.

Таким чином, в установці струминного підйомника, спущеного в свердловину на глибину L , в інтервалі $L - L'$ буде відбуватися підйом негазованої рідини за допомогою струминного апарату, а, починаючи з глибини L' , буде здійснюватися її фонтанування за рахунок енергії напору, яка відповідає тиску насичення $p_{i \text{ан}}$ і енергії розширення пластового газу, що буде виділятися із потоку цієї рідини.

Коли $\alpha < \alpha'$ тиск на викиді струминного апарату можна визначити із співвідношення

$$p_c = \frac{iG_0}{\alpha'(i+B)} + (\alpha - \alpha') \rho_c g \quad (4.12)$$

Значення коефіцієнтів гідравлічного опору λ_k визначаються з відомих залежностей у відповідності до умов, що розглядаються.

Для кільцевого простору

а) якщо $Re < 1200$, то тоді

$$\lambda_k = \frac{16\pi(D_6 + d_3)\mu_c}{Q_c \rho_c} \quad (4.13)$$

б) якщо $Re \geq 1200$, то тоді

$$\lambda_k = \frac{0,2365}{\left(\frac{4Q_c \rho_c}{\pi(D_6 + d_3)\mu_c}\right)^{0,21}} \quad (4.14)$$

Для визначення ρ_c використаємо такі залежності

а) якщо $p_6 < p_{нас}$ і $p_c \geq p_{нас}$, то тоді

$$\rho_c = \frac{\rho_n \rho_p (1+i)}{\rho_n + \rho_p} \quad (4.15)$$

б) якщо $p_6 < p_{нас}$ і $p_c < p_{нас}$, то тоді

$$\rho_c = \frac{\rho_p(\rho_n + G_0 \rho_{zo})(1+i)}{\rho_n + G_0 \rho_{zo} + i \rho_p \left[1 + (G_0 - \alpha' \rho_c) \frac{p_0}{p_c}\right]} \quad (4.16)$$

в) якщо $p_6 \geq p_{нас}$ і $p_c > p_{нас}$, то тоді

$$\rho_c = \frac{\rho_n \rho_p (1+i)}{\rho_n + i \rho_p} \quad (4.17)$$

Для визначення відносного перепаду тиску на струминному апараті (за Соколовим і Зінгером)

$$A = \frac{\Delta p_c}{\Delta p_p} = \frac{\varphi_l^2}{m} \left[2\varphi_2 \left(1 + \frac{\Delta p_k}{\Delta p_p}\right)^{0,5} + \frac{2\varphi_2 \rho_p i^2}{\rho_n(m-1)} - \frac{(2 - \varphi_3^2) \rho_p (1+i)^2}{m \rho_c} \right] - \frac{\Delta p_k}{\Delta p_p}, \quad (4.18)$$

$$\text{де } \frac{\Delta p_k}{\Delta p_p} = \left(\frac{\varphi_l}{\varphi_4}\right)^2 \frac{p_p \cdot i}{p_n(m-1)}$$

$\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$ - коефіцієнт швидкості відповідно робочого сопла, камери змішування, дифузора, вхідної ділянки камери змішування ($\varphi_1 = 0,95$; $\varphi_2 = 0,975$; $\varphi_3 = 0,9$ $\varphi_3 = 0,924$);

m - коефіцієнт, який визначається співвідношенням площ робочого сопла і камери змішування.

Перепад тиску на насадці струминного апарату

$$\Delta p_p = \frac{p_c - p_n}{A} \quad (4.19)$$

Тиск на вході в насадку струминного апарату

$$P_p = \Delta p_p + p_n \quad (4.20)$$

Тиск на викиді наземних агрегатів на гирлі свердловини

$$P_a = P_p - p_{zp} + p_{мер}, \quad (4.21)$$

де p_{zp} - тиск, що створюється стовпом рідини при вході в насадку;

$p_{мер}$ - витрати тиску на тертя в НКТ

$$p_{мер} = \frac{8\lambda L Q_p^2 P_p}{\pi^2 d_g^5} \quad (4.22)$$

Діаметр сопла струминного апарату визначається із залежності

$$d_c = \left[\frac{2Q_p}{\mu \pi} \left(\frac{2P_p}{\Delta p_p} \right)^{0,5} \right]^{0,5}, \quad (4.23)$$

де μ - коефіцієнт витрати робочого сопла струминного насосу.

Діаметр камери змішування визначається із залежності

$$d_{кз} = d_c m^{0,5}, \quad (4.22)$$

де $m = \frac{f_c}{f_{кз}}$

f_c - площа сопла;

$f_{кз}$ - площа камери змішування.

Вище приведеними залежностями визначаються основні параметри роботи струминної установки.

4.4 Підготовка робочої рідини на поверхні

Запобігання і видалення асфальтеносмолопарафінових відкладів (АСПВ) є надзвичайно розповсюдженою і актуальною проблемою в практиці експлуатації нафтових свердловин. Відкладання цих речовин призводить до частих зупинок свердловин для очищення глибинного обладнання від відкладів, істотних витрат на депарафінізацію і поточний ремонт свердловин, а також до зниження видобутку і значного недобору та втрат нафти. З досвіду експлуатації свердловин в умовах нафтових родовищ України відомо, що близько 30 – 35 % всіх зупинок свердловин для виконання поточних ремонтів відбувається внаслідок відкладення парафіну на поверхні насосно-компресорних труб (НКТ), що неминуче призводить до зменшення діаметру прохідного перерізу труб і до зниження дебітів свердловин, до відмов штангових свердловинних насосних установок та іншого обладнання.

У низці робіт [106-108] вивчено механізм, умови відкладання асфальтеносмолопарафінових речовин (АСПР) і рекомендовано різні способи попередження відкладання АСПР і видалення АСПВ.

Парафіни, асфальтени та смоли, які в нормальних умовах являють собою тверді кристалічні речовини, в пластових умовах та умовах вибою свердловини найчастіше розчинені в нафті. При певних термобаричних умовах (зниження температури і тиску та розгазування нафти при русі її по стовбуру свердловини від вибою до гирла) асфальтеносмолопарафінові речовини випадають із нафти у вигляді кристалів. Останні можуть залишатися у завислому стані і виноситися висхідним потоком нафти на поверхню. Проте, АСПР можуть також відкладатися по всьому шляху руху нафти від пласта до установки підготовки нафти: 1) у привибійній зоні пласта (в поровому просторі); 2) на вибої та стінках свердловини; 3) у викидних лініях свердловин та нафтопроводах при транспортуванні нафти, в трапах і приймальних резервуарах. Випаданню АСПР з нафти сприяє значне пониження температури при підніманні нафти на поверхню.

Ефект охолодження потоку нафти зумовлений зниженням температури навколишнього середовища та виділенням із нафти газу, підсилюється в міру наближення до гирла свердловини. Тому АСПВ, головним чином, спостерігаються у верхній частині піднімальних труб в інтервалі глибин від 1000 м до 200 – 100 м (де, як правило, є максимальна їх кількість), а також у викидних лініях, де відкладання АСПВ збільшується в холодний час року. Вище від глибини 100 – 200 м шар АСПВ зменшується за рахунок змивання їх потоком свердловинної продукції.

Основними факторами, що зумовлюють утворення АСПВ, є :

- компонентний склад нафти, тобто концентрація асфальтенів, смол і парафінів;
- зниження температури рідини до температури початку кристалізації парафіну;
- обводненість свердловини та ймовірність утворення емульсії;
- зниження тиску по стовбуру свердловини до тиску насичення і наступне розгазування нафти;
- швидкість висхідного потоку рідини та його режим;
- шорсткість стінок труб і наявність механічних домішок.

Без сумніву, одним із головних факторів, що визначають умови зародкоутворення і кристалізації осадів, які у свою чергу впливають на формування АСПВ, є концентрація парафінів. Проте, з літературних джерел стає очевидним, що істотну роль відіграють також асфальтени і смоли, що впливають на структуру відкладів [106]. Визначальним чинником при цьому є відношення концентрації асфальтенів (або асфальтенів та смол) до концентрації парафінів.

Фактором, що сильно впливає на здатність утворення АСПВ на поверхні труб, поряд зі зміною температури, є також швидкість потоку рідини. Вона визначає гідродинамічний режим. Відомо, що при дебітах нафти понад 70 т/добу парафінові відклади не спостерігаються [107, 108]. Істотно впливають на

утворення відкладів характеристики поверхні. Значна шорсткість поверхні (висота виступів 7–9 мкм і більше) сприяє утворенню АСПВ, а висока полярність поверхні труб, навпаки, перешкоджає цьому.

Кількість відкладеного парафіну в міру переміщення до гирла свердловини зростає за рахунок того, що він інтенсивніше переходить з рідкої фази в тверду, і за рахунок виносу його на оболонках газових бульбашок. Крім того, виявляється, що температура плавлення парафіну, що утворюється, зменшується від низу НКТ до верху, то можна прийти до висновку, що у верхній частині колони НКТ відбувається відкладення більш термостійких парафінів, а в нижній – менш тугоплавких.

На початковій стадії роботи комплексу обладнання для видобування високов'язких нафт в якості робочої рідини буде використовуватися легка нафта густиною 800-830 кг/м³. Необхідний об'єм такої нафти повинен дорівнювати подвійному внутрішньому об'єму експлуатаційної колони. Коли зі свердловини на денну поверхню, завдяки роботі струминного насоса, почне поступати суміш високов'язкої і легкої нафти і загальна густина її збільшиться, то виникне необхідність у додатковій обробці цієї рідини кавітаційним пристроєм, який змонтований на мірній ємності. Застосування цього пристрою також дасть змогу зменшити дію факторів, що зумовлюють утворення асфальтеносмолопарафінових відкладів на нафтовидобувному обладнанні. Принцип роботи кавітаційного пристрою такий (див. рис 4.2 і 4.3).

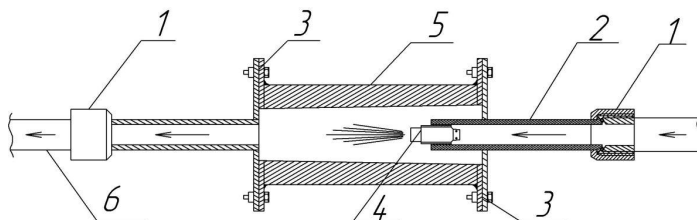


Рисунок 4.2 – Кавітаційний пристрій для підготовки робочої суміші:

*1 – швидкокороз'ємне з'єднання; 2 – патрубков; 3 – фланцеве з'єднання;
4 – гідродинамічний кавітатор; 5 – робоча камера; 6 - нагнітальна лінія*

З нижньої частини мірної ємності через фільтр поршневим насосом подається видобута із свердловини нафтова суміш на кавітаційний пристрій. Суміш, проходячи через гідродинамічний кавітатор, потрапляє в робочу камеру, де піддається синергічній дії фізичних полів. Завдяки кавітації (див. розділ 3), в'язкість суміш знижується і вона поступово нагрівається. Оброблена таким чином нафтова суміш потрапляє у нагнітальну лінію і спрямовується у верхню частину мірної ємності. Тобто, нафта розріджується і підігрівається перед транспортуванням її на збірний пункт. Це є позитивним фактором у холодну пору року і дозволить зменшити відклади АСПВ на внутрішніх стінках трубопроводу і збільшити швидкість перекачування.

Завдяки гравітаційному ефекту у верхній частині ємності буде зосереджуватися нафта з меншою густиною і в'язкістю. Тому нафта з верхньої частини ємності буде повторно спрямовуватися у свердловину і частково нагрівати експлуатаційну колону і ліфтові труби. Що в свою чергу призведе до зменшення швидкості накопичення осадів на внутрішніх і зовнішніх поверхнях труб.

4.5 Технологічна схема обв'язки обладнання для видобування нафти за допомогою струминного насоса з розділеними робочими потоками

Цією схемою передбачається така область застосування:

- 1) глибина свердловини від 700 м до 2000 м;
- 2) в'язкість нафти на вибої свердловин від 20 мПа·с до 100 мПа·с ;
- 3) продуктивність свердловини від 5 до 100 м³/добу;

Обладнання повинно включати в себе:

- 1) фонтанну арматуру;
- 2) комплект насосно-компресорних труб;

3) гідродинамічний кавітатор для імпульсно-хвильової дії на високов'язкі нафти, в якому реалізований ефект зменшення в'язкості нафти в камері всмоктування за рахунок розчинення високов'язкої нафти потоком робочої рідини та дії кавітації;

4) гідромеханічний або механічний пакери;

5) наземний гідропривід;

6) наземний кавітаційний пристрій для обробки видобутої нафтової суміші з зниження в'язкості;

6) лінію нагнітання робочої рідини, обладнану зворотним клапаном і фільтром з діаметром отворів не більше 3,5 мм;

7) мірну ємкість з витратоміром;

8) ємкість технологічної рідини;

Спосіб роботи насосно-ежекторної свердловинної струминної установки з гідродинамічним кавітатором для видобування високов'язких нафт захищений патентом України 57331 [109]. В основу роботи обладнання поставлено задачу вдосконалити спосіб роботи насосно-ежекторної установки для видобування високов'язких нафт таким чином, щоб збільшити продуктивність свердловини і при цьому зменшити енерговитрати за рахунок зменшення в'язкості нафти, яка видобувається.

Поставлена задача вирішується тим, що у способі роботи ежекторної свердловинної імпульсної установки для видобування високов'язких нафт, згідно з яким здійснюється подача активного рідкого керованого середовища по затрубному просторі в радіальні отвори корпусу струминного насосу і до каналу вставки високонапірного струминного насосу, де відбувається розділення на два потоки: один подається на сопло ежектора струминного насосу, а другий на гідродинамічний кавітатор, з допомогою якого відбувається обробка пасивного середовища (високов'язкої нафти), а відкачування обробленого пасивного середовища відбувається за допомогою насосу по колоні насосно-компресорних труб.

Піднімання високов'язкої нафти з свердловини проводять за такою схемою (див. рис. 4.3).

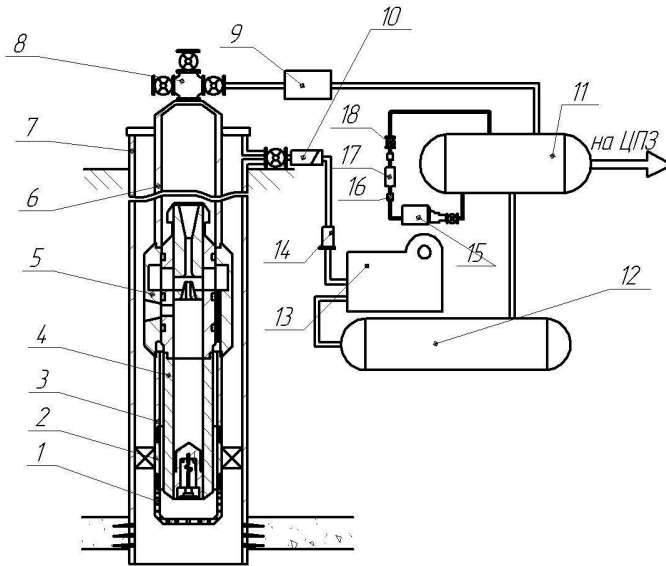


Рисунок 4.3 – Технологічна схема обв'язки обладнання для видобування нафти за допомогою струминного насоса з розділеними робочими потоками:

1 – фільтр-кінцевик; 2 – пакер; 3, 6 – НКТ; 4 – приставка з гідродинамічним кавітатором; 5 – струминний насос; 7 – експлуатаційна колона; 8 – фонтанна арматура; 9 – витратомір; 10 – зворотний клапан; 11 – резервуар для видобутої нафти; 12 – резервуар з легкою нафтою; 13 – насосна установка; 14 – фільтр; 15 – поршневий насос; 16 – швидкокороз'ємне з'єднання; 17 – кавітаційний пристрій; 18 – засувка.

4.6 Промислові приймальні випробування комплексу обладнання для видобування високов'язких нафт

З метою визначення працездатності дослідного зразка комплексу обладнання для видобування високов'язких нафт і вибору оптимальних параметрів його роботи на свердловині № 95 Бугруватівського родовища були проведені промислові випробування.

Для проведення приймальних випробувань дослідного зразка комплексу

обладнання наказом ВАТ «Укрнафта» була призначена комісія.

Після проведення промислових приймальних випробувань комісією був складений акт і зроблені висновки і рекомендації:

1. Комплект обладнання для видобутку високов'язких нафт роботоздатний.
2. Рекомендується впровадити на нафтовидобувних підприємствах України, розробивши типову технологію видобутку високов'язких нафт.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Перший заступник голови

Правління ВАТ "Укрнафта"

Конишев Б.І.

1998 р.



А К Т

Про проведення приймальних випробувань дослідного зразка комплексу обладнання для видобутку високов'язких нафт на свердловині № 95 Бугруватівського родовища.

Комісія призначена ВАТ "Укрнафта" наказом № 182 від 18.11.1997 в складі :

Голова комісії Лилак М.М. - головний інженер НГВУ "Охтирканафтогаз"
Члени комісії: Щелинський М.О. - головний геолог НГВУ "Охтирканафтогаз";
 Копичко В.С. - начальник ВТВ НГВУ "Охтирканафтогаз";
 Красько В.І. - начальник управління видобутку і транспортування нафти ВАТ "Укрнафта" ;
 Лігоцький М.В. - заступник начальника технологічного відділу ВАТ "Укрнафта";
 Шандровський Т.Р. - с. н. с. НДІНГТ при ІФДТУНГ ;
 Якимечко Я.Я. - завідувач лабораторіями кафедри морських нафтогазових споруд ІФДТУНГ

склали даний акт в тому, що в період з 12.08.1998 р. по 27.08.1998 р. на свердловині № 95 Бугруватівського родовища проводились роботи по випробуванню дослідного зразка комплексу обладнання для видобутку високов'язких нафт.

Ціль роботи : визначення працездатності комплексу обладнання в промислових умовах і вибір оптимальних параметрів при видобутку високов'язкої нафти.

Геолого-технічна характеристика свердловини

- | | |
|------------------------------|-------------------|
| 1. Вибій свердловини | - 3555 м |
| 2. Експлуатаційна колона: | |
| діаметром 168 мм до глибини | - 1809 м |
| діаметром 146 мм до глибини | - 3555 м |
| 3. Інтервал перфорації В-21 | 3497-3508 м |
| В-20 | 3478-3480 м |
| 4. Динамічний рівень | - 1508 м |
| 5. Коефіцієнт продуктивності | - 0,06 т доб./атм |



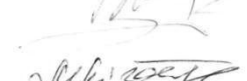
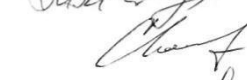
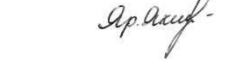


Для проведення робіт в свердловину була спущена така компоновка :

- фільтр-хвостовик - 10 м ;
- НКТ 73 мм - 18 м ;
- пакер механічний ;
- НКТ 73 мм - 20 м ;
- корпус насоса ;
- НКТ 73 мм - 18 м ;
- НКТ 89 мм - до гирла свердловини.

Після встановлення пакера провели його опресування тиском 16 МПа, витримка 15 хв. Обладнали гирло свердловини згідно затвердженого плану робіт. За допомогою канатної техніки замінили опресувальний клапан на ежекторний насос з гідроакустичним кавітатором. Подаючи робочу рідину в затрубний простір, створили агрегатом ЦА-320 тиск 15 МПа і підтримували його 30 хвилин. Розхід рідини на агрегаті складав 1,8 л/с. Із свердловини за цей час відпомповано 100 л рідини. Після 10 хв. перерви продовжили роботу агрегатом з такою періодичністю : 30-40 хв. - робота, 10-15 хв. пауза. Провели ще 7 циклів, відпомпували 900 л рідини. Коефіцієнт ежекції насоса становив 0,03. На четвертому циклі появились сліди нафти, почали відбирати проби. Об'ємний вміст нафти становив 10-15 %. Провести лабораторні дослідження проб на зниження в'язкості нафти не вдалося через те, що проба повинна відстоюватися 12 годин для гравітаційного розділення нафти і води, а дія гідроакустичної обробки зберігається протягом 4-5 годин.

Висновки і пропозиції :

1. Комплект обладнання для видобутку високов'язких нафт роботоздатний.
2. Рекомендується впровадити на нафтовидобувних підприємствах України, розробивши типову технологію видобутку високов'язких нафт.

 М.М. Лилак
 М.О. Щелинський
 В.С. Коничко
 В.І. Красько
 М.В. Лігоцький
 Т.Р. Шандровський
 Я.Я. Якимечко

На основі акту про проведення промислових випробувань нами були розроблено стандарт підприємства СТП 320.00135390.01-98 «Технологія видобування високов'язких нафт за допомогою вставного струминного апарату з розділеними робочими потоками», який було затверджено і надано чинності першим заступником голови правління акціонерного товариства «Укрнафта», наказ № 35 від 01.03.1999 р. (додаток Ж). Стандарт підприємства введено в дію вперше.

Вихідні дані зі свердловини № 95 Бугруватівська для обрахунку збільшення дебіту під час проведення приймальних промислових випробувань

Статичний рівень: $h_{ст}=1283$ м

Динамічний рівень: $h_{д}=1508$ м

Коефіцієнт продуктивності: $\eta = 0,06$ т·доб/атм або $0,6$ т·доб/МПа

Маючи динамічний рівень можемо стверджувати, що депресія буде становити $\Delta P=23$ атм. або $\Delta P=2,3$ МПа (рівень рідини зможе знизитися до 1508 м), звідси дебіт свердловини при відомому коефіцієнті продуктивності

$$q = \eta \cdot \Delta P = 0,6 \cdot 2,3 = 1,37 \text{ т/добу};$$

При роботі струминного насоса максимальне зниження рівня відбувалося до глибини 1400 м, тобто $h_{д}=1400$ м, а отже депресія буде $\Delta P=1,1$ МПа. При такому режимі було відкачано $0,9$ м³ за 7 год., тобто $3,09$ м³/добу.

При середній густині рідини $1,04$ г/см³ дебіт буде:

$$m = V \cdot \rho = 3,09 \cdot 1,04 = 3,21 \text{ т/добу.}$$

Тоді дебіт збільшиться

$$\Delta q = 3,21 / 1,37 = 2,34 \text{ рази.}$$

Вирахуємо коефіцієнт продуктивності:

$$\eta = q / \Delta P = 3,21 / 1,1 = 2,91 \text{ (т/добу)/МПа}$$

Порівнюючи коефіцієнти продуктивності до і після застосування струминного насосу з гідродинамічним кавітатором: $2,91 / 0,6 = 4,86$ рази.

Отже, з використанням струминного насосу з гідродинамічним кавітатором дебіт збільшився у 2,34 рази, а коефіцієнт продуктивності збільшився у 4,86 рази.

Технологічний процес здійснюється таким чином. В свердловину, обсажену обсадною колоною, на насосно-компресорних трубах спускають струминний апарат, який складається із струминного насоса і гідродинамічного кавітатора для імпульсно-кавітаційної обробки високов'язкої нафти. На розрахованій глибині в свердловині встановлюють пакер. Включають в роботу наземний гідропривід і робоча рідина під заданим тиском подається по нагнітальній лінії через фільтр і зворотний клапан в затрубний простір до струминного апарату.

Одна частина робочої рідини потрапляє через вхідні тангенціальні отвори в кільцеву конусоподібну камеру завихрення гідродинамічного кавітатора, де потік рідини під дією центробіжної сили сильно закручується та ініціює виникнення прецесуючого вихрового ядра, яке скручується по довжині струменя. Рухаючись по стінках кругової конусоподібної камери від перерізу з більшим діаметром до перерізу з меншим діаметром, закручений струмінь збільшує свою швидкість руху. Збільшення швидкості руху означає збільшення кінетичної енергії струменя. За законом збереження енергії зростання кінетичної енергії неминуче викличе падіння потенційної енергії, а роль потенційної енергії в потоці робочої рідини виконує тиск. Таким чином, чим меншим буде діаметр, тим вищою в ньому буде швидкість руху закрученого струменя і тим нижче впаде тиск. Як тільки тиск у своєму падінні наблизиться за величиною до тиску насичених парів почнеться бурхливе пароутворення. Тобто, почнеться холодне адіабатне кипіння рідини. Цей процес буде супроводжуватися утворенням бульбашок, в середині яких будуть знаходитися пари рідини. Нижній кінець центрального пружинного стержня, перебуваючи під одночасною дією перепадів швидкості закрученого струменя і прецесуючого вихрового ядра, буде здійснювати поперечні коливальні рухи, створюючи ще більше завихрення та інтенсифікуючи утворення парогазових бульбашок або каверн. На виході з камери завихрення при проходженні рідини через ступінчатий дифузор, діаметр якого поступово буде збільшуватися і відповідно швидкість руху рідини буде зменшуватися, а тиск відповідно збільшуватиметься. Стінки парових бульбашок, в середині яких тиск буде нижчий

за атмосферний ($P_{\text{вб}} < 0,1$ МПа), почнуть стрімко рухатися назустріч один одному. Чим більшим буде зовнішній тиск, тим більшим буде сила, яка діє на стінки, тим більшим буде їх прискорення. Незначна частина пари в об'ємі бульбашки буде завжди присутня. Кількість її мала, і тому більшу частину процесу лускання пара не здійснює суттєвого спротиву зближенню стінок бульбашки. І лише в кінці, коли об'єм бульбашки складає відсотки або долі відсотка від її максимального об'єму, їх тиск за величиною наближається до зовнішнього тиску на стінки бульбашки. Але оскільки стінки вже набрали швидкість та інерцію, тому зупинити їх неможливо. У результаті швидкісний напір стінок продовжує стискати бульбашку і вона лускає з виникненням потужних мікропотоків, які подібні до кумулятивних струменів. В цей момент нагрівання рідини буде відбуватися за рахунок енергії, яка звільняється при гальмуванні струменя під час кавітаційних процесів, тобто за рахунок гідравлічного тертя.

Одночасно збільшення тиску призведе до зворотного процесу – конденсації пари. Температура в центрі бульбашки, що луснула, в результаті стиснення буде значно перевищувати температуру робочої рідини. Це перевищення, на думку деяких дослідників, може досягати десятків і навіть сотень градусів.

Час існування парогазових каверн визначається швидкісним напором рідини на виході з кавітатора. При високій швидкості обертання потік рідини спочатку закручується, потім звужується. В процесі звуження потоку значно зростає колова складова швидкості, виникають центробіжні сили, які створюють у вихідному каналі насадки тонку плівку кільцевої форми перерізу. Дана плівка, виходячи з насадки, розпадається на дрібні краплини.

Таким чином, потік високов'язкої нафти, яка рухається з підпакерного простору в зону пониженого тиску струминного насоса, потрапляє в зону дії кавітації. Внаслідок чого знижує свою в'язкість [109]. Це позитивно відображається на прокачуваності нафти і зменшує ймовірність закупорювання парафіном каналів і отворів свердловинного і наземного обладнання. Під час кавітації у нафті виникають знакозмінні тиски, що сприяє розриву безперервного

ланцюжка високов'язкої нафти, руйнуючи зв'язки між окремими частинками молекул.

Друга частина робочої суміші спрямовується в сопло насоса, звідки витікаючи з великою швидкістю, утворює зону зниженого тиску, внаслідок чого робоча рідина і нафта із підпакерного простору потрапляє в камеру змішування дифузора насоса. Далі ця суміш по насосно-компресорним трубам піднімається на поверхню.

При дебіті свердловини, наприклад, $10 \text{ м}^3/\text{добу}$ за одну секунду струминним насосом буде всмоктуватися 115 грам нафти. Як видно з рис. 3.9 частота коливань на виході з гідродинамічного кавітатора становила 10-12 Гц. Таким чином, нафта об'ємом 115 мл буде піддаватися впливу кавітаційних коливань від 10 до 12 разів за одну секунду.

На підставі результатів теоретичних, експериментальних досліджень і промислових випробувань, розв'язано актуальну задачу з вдосконалення технології видобування високов'язких нафт струминними насосами з використанням енергії пульсуючих потоків. Одержано наступні основні висновки.

Теоретичні дослідження руху закрученого струменю робочої рідини при умові існування прецесуючого вихрового ядра і оцінки його впливу на ефект кавітації дозволили отримати уточнену залежність ступеня кручення потоку від витрати рідини, частоти коливань вихрового ядра в умовах стійкості самого закрученого потоку. Було визначено, що ступінь кручення потоку прямо пропорційний частоті коливань прецесуючого вихрового ядра і обернено пропорційний квадрату витрати рідини. Тобто забезпечення стійкості закрученого потоку при варіюванні витрати вимагає відповідної зміни ступеню кручення або впливу на частоту коливань прецесуючого вихрового ядра.

Вперше встановлено залежність зміни показника політропи нафти від часу її обробки гідродинамічним кавітатором в межах температур від $16 \text{ }^\circ\text{C}$ до $34 \text{ }^\circ\text{C}$, яка показала, що після $30 \text{ }^\circ\text{C}$ наступає її стабілізація. Це свідчить про те, що завдяки такій обробці відбувається перехід нафти від стану неньютонівської до ньютонівської рідини і подальша обробка нафти призведе до зниження її

в'язкості, але при значно менших темпах.

Виявлено, що зниження в'язкості високов'язкої нафти з перших секунд відбувається внаслідок штучного створення кавітаційних явищ, які генеруючи знакозмінні коливання тиску, руйнують механічну структуру високов'язкої нафти, що сприяє збільшенню швидкості її відкачування із свердловин глибиною до 2000 м.

Розроблено удосконалену конструкцію гідродинамічного кавітатора, який вміщує у собі конусну вихрову камеру з тангенціальними вхідними каналами і з внутрішньою поверхнею вихрової камери, виконаною у вигляді гвинтової направляючої для більшого закручування потоку рідини. В конструкції передбачено центральний пружинний стержень, який перебуваючи під впливом перепаду тиску між потоком робочої рідини і центральною зоною пониженого тиску, здійснює інтенсивні поперечні коливання, що деформує периферійний потік, викликаючи в ньому періодичні пульсації швидкості і тиску та призводить до інтенсифікації утворення парогазових бульбашок. Конструкцію гідродинамічного кавітатора захищено патентом України № 36439 А.

Вперше в якості робочої рідини для струминного насоса запропоновано використовувати видобуту високов'язку нафту, яка попередньо обробляється за допомогою розробленого кавітаційного пристрою, який змонтований на приймальній ємності, що дає можливість знизити в'язкість нафти перед подачею її у свердловину або перед транспортуванням її на збірний пункт.

Експериментально встановлено характер пульсацій потоку робочої рідини, який полягає у зменшенні величин тиску на виході з гідродинамічного кавітатора з амплітудою від 0,21 до 0,28 МПа і частотою від 10 до 12 Гц.

Удосконалено технологію видобування високов'язких нафт за допомогою вставного струминного насоса з розділеними робочими потоками, в який для зниження в'язкості і густини високов'язкої нафти вмонтовано гідродинамічний кавітатор, що сприяє збільшенню швидкості відкачування нафти із свердловини у 2,3 рази.

Промисловими приймальними випробуваннями дослідного зразка

комплекту обладнання для видобування високов'язких нафт на свердловині № 95 Бугруватівського родовища НГВУ «Охтирканафтогаз» доведено його ефективність і роботоздатність. Комісія, призначена наказом ВАТ «Укрнафта», рекомендувала розробити типову технологію видобування високов'язких нафт.

Розроблено і введено в дію стандарт підприємства СТП 320.00135390.016-98 «Технологія видобування високов'язких нафт за допомогою вставного струминного апарату з розділеними робочими потоками». Стандарт введено в дію вперше.

Спосіб роботи насосно-ежекторної свердловинної струминної установки з гідродинамічним кавітатором для видобування високов'язких нафт захищений патентом України № 57331.

Список літератури:

1. Якимечко Я.Я. Деякі концепції видобування високов'язких вуглеводнів / Я.Я. Якимечко // Нафта і газ України-2000: матеріали 6-ої міжнар. наук.-практ. конф., 31 жовтня-3 листопада 2000 р. – Івано-Франківськ, 2000. – Т.2. - С. 212-213.
2. Радченко І.Г., Бульбас В.М., Лилак М.М., Копичко В.С., Рубан І.Г., Канівець В.М. Технологія видобутку високов'язкої нафти Бугруватівського родовища / І.Г. Радченко, В.М. Бульбас, М.М. Лилак, В.С. Копичко, І.Г. Рубан, В.М. Канівець // Нафта і газ України-2000: матеріали 6-ої міжнар. наук.-практ. конф., 31 жовтня-3 листопада 2000 р. – Івано-Франківськ, 2000. – Т.2. – С. 210.
3. Національна програма «Нафта і газ України» до 2010 року, - К: 1993.- 62 с.
4. Шандровський Т.Р. До проблеми створення насосів для підймання із свердловин високов'язких нафт / Т.Р. Шандровський, Я.Я. Якимечко // Нафтова і газова промисловість. - 1999. - № 2. - С. 41-44.
5. Богомольный Г. И. Определение области возможного применения штанговых глубиннонасосных установок для добычи высоковязких жидкостей / Г.И. Богомольный // Тр. ин-та / МИНГП им. И.М. Губкина. – 1982. Вып. 165. С. 107-121.
6. Пирвердян А.М. Гидромеханика глубиннонасосной эксплуатации. – М: Недра, 1965. – 191 с.
7. Люстрицкий В.М. Применение штанговых насосов для откачки вязких жидкостей из скважин / В.М. Люстрицкий // Нефтепромысловое дело. – 1977. - № 22. – С. 17-22.
8. Мищенко И.Т. Основные факторы, осложняющие процесс добычи нефти / И.Т. Мищенко // Тр. ин-та / МИНГП им. И.М. Губкина. – 1982. Вып. 165. С. 5-14.
9. Максимов В.П. Эксплуатация нефтяных месторождений в осложненных условиях / Максимов В.П. – М: Недра, 1976. – 241 с.
5. Казак А.С. Глубинные струйные насосы для добычи нефти в США /А.С. Казак // Нефтяное хозяйство. – 1986. - № 4. – С. 76-79.

11. Matheny S.L. Space-age technology aids production – Oil and Gas Journal. 1980, v. 78, N 40, p. 74, 75.

12. Якимечко Я.Я. Інтенсифікація видобування важких нафт зниженням їх в'язкості за допомогою гідродинамічного кавітатора / Я.Я. Якимечко, Р.С. Яремійчук, Т.Р. Шандровський, О.Ю. Витязь, Я.М. Фем'як // Нафтова і газова промисловість. - 2005. - № 6. – С. 24-26.

13. Сургучов М.Л. Гидродинамическое, акустическое, тепловое циклические воздействия на нефтяные пласты / Сургучов М.Л., Кузнецов О.Л., Симкин Э.М. - М: Недра. – 1975. – 185 с.

14. Фридман В.М. Ультразвуковая химическая аппаратура / Фридман В.М. – М.: Машиностроение. – 1967. – 300 с.

15. Ультразвуковая технология / Под ред. Б.А. Аграната. - М.: Металлургия, 1974. - 505 с.

16. Основы физики и техники ультразвука: [учеб. пособие для вузов] / Агранат Б.А., Дубровин М.Н., Хавский Н.Н., Эскин Г.И. – М.: Высшая школа. – 1987. – 352 с.

17. Ультразвук. Малая энциклопедия. - М.: Гостехиздат, 1979. - 400 с.

18. Вахитов Г.Г., Симкин Э.М. Использование физических полей для извлечения нефти из пластов / Г.Г. Вахитов, Э.М. Симкин. - М.: Недра.- 1985. - 231с.

19. United States Patent 4,702,315, Int. Cl. E 21B 43/25. Method and apparatus for sonically stimulating oil wells to increase the production thereof / Albert G. Bodine.; appl. № 900,587; filed: Aug. 26, 1986; date of Patent: Oct. 27, 1987.

20. А.с. 479498 СССР, МКИ В 06b 1/18. Вихревой акустический излучатель / О.Е. Цок, Я.Д. Климишин (СССР). - № 1884638/18-10; заявл.20.02.73; опубл. 05.08.75, Бюл. № 29.

21. United States Patent 3,911,858, Int. Cl. F15C 1/16; B06B 3/00; G10K 10/00. Vortex acoustic oscillator / R. Wendell Goodwin.; Assignee: United Technologies Corporation, Hartford, Conn. – appl. № 4756090 ; filed: May 31, 1974; date of Patent: Oct. 14, 1975.

22. А.с. 645713 СССР, МКИ В 06 В 1/20. Вихревой генератор / Я.Д. Климишин, А.И. Михельман (СССР). - № 2495488/18-28; заявл. 01.06.77; опубл. 05.02.79; Бюл. № 5.

23. А.с. 354903 СССР, МКИ В 06b 1/18. Ультразвуковой гидродинамический излучатель / А.А. Байшулаков, В.Г. Варламов, Д.Г. Ефремушкин, Г.П. Коновалов, Ю.В. Малахов, М.А. Соколов (СССР). - № 1450089/18-10; заявл. 18.06.1970; опубл. 16.10.1972, Бюл. № 31.

24. А.с. 817219 СССР, МКИ Е 21 В 43/00. Гидравлический вибратор / И.Ф. Гайденок, В.В. Калашнев, Б.З. Сергеев, Р.Г. Ходжаев, Е.В. Демиденко, И.Я. Марченко (СССР). - № 2635839/22-03; заявл. 29.06.78; опубл. 30.03.81, Бюл. № 12.

25. Гуревич М.И. Теория струй идеальной жидкости / Гуревич М.И. – М.: Наука, 1979. – 536 с.

26. Гуревич М.И. Симметричное кавитационное обтекание плоской пластинки, помещенной между параллельными стенками / Гуревич М.И. -Изв. АН СССР. ОТН, 1946, №4, - С.487-498.

27. Перник А.Д. Проблемы кавитации / Перник А.Д. -Л.: Судостроение, 1966. – 439 с.

28. Эпштейн Л.А. Методы теории размерности и подобия в задачах гидродинамики судов / Эпштейн Л.А. -Л.: Судостроение, 1970. – 206 с.

29. Ивченко В.М. Нестационарные задачи гидромеханики суперкавитирующих тел / В.М. Ивченко // Гидроаэродинамика несущих поверхностей. - Киев: Наукова думка, 1966. - С. 230-246.

30. Логвинович Г.В. Гидродинамика течений со свободными границами / Логвинович Г.В. - Киев: Наук, думка, 1969. - 208 с.

31. Биркгоф Г. Математический анализ кавитации / Г. Биркгоф // Неустановившееся течение воды с большими скоростями. - М.: Наука, 1973. - С. 19-38.

32. Биркгоф Г., Сарантонелло Э. Струи, следы, каверны / Г. Биркгоф, Э. Сарантонелло. - М.: Мир, 1964. – 457 с.

33. Рождественский В.В. Кавитация / В.В.Рождественский. - Л.: Судостроение, 1977. – 248 с.
34. Кнепп Р. Кавитация / Кнепп Р., Дейли Дж., Хеммит Ф. - М.: Мир, 1974. - 678 с.
35. Джонсон Э. Экспериментальное исследование кавитационных течений / Э. Джонсон // Неустановившееся течение воды с большими скоростями. - М.: Наука, 1973. - С. 59-84.
36. Труды ЦАГИ. Рассекречено акт МК № 4/54с от 01. 11. 1958 г.
37. Rayleigh. On pressure developed in a liquid during the collapse of a spherical cavity. Phil. Mag. 34, 94 (1917).
38. Иванников В.И. Кавитация и возможности ее применения при бурении, освоении и эксплуатации скважин / В.И. Иванников, И.В. Иванников // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2002. - № 12. – С. 5 – 11.
39. Федоткин И.М. Использование кавитации в технологических процессах / И.М. Федоткин, А.Ф. Немчин. – К.: Вища школа, 1984. – 68 с.
40. Пилипенко А.В. Кавитационные автоколебания / А.В. Пилипенко. – М.: Энергия, 1982. – 314 с.
41. Яремійчук Р.С. Руйнування гірських порід при кавітаційному бурінні свердловин / Р.С. Яремійчук, Я.М. Фем'як, Я.Я. Якимечко // Тези науково-технічної конференції професорсько-викладацького складу ІФНТУНГ “Секція ГНПФ та ФНГП”. – Івано-Франківськ. – 1999. – С. 111–112.
42. Plesset M., Chapman R. Collapse of an initially spherical vapor cavity in the neighbourhood of solid boundary / M. Plesset, R. Chapman. - J. Fluid Mechanic, 1971, 47,2, - p. 238 – 290.
43. Ибрагимов Л.Х. Теория и практика применения затопленных скоростных турбулентных струй и вскипающих адиабатных потоков для воздействия на призабойные зоны скважин: [монография] / Л.Х. Ибрагимов. – М.: ВНИИОЭНГ, 1997. – 112 с.
44. Паневник О.В. Дослідження кавітаційних характеристик струминних

свердловинних апаратів / О.В. Паневник, Р.С. Яремійчук // Розвідка та розробка нафтових і газових свердловин. – Вип. 32. – Івано-Франківськ. – 1995. – С. 80 – 85.

45. Паневник О.В. Використання ежекційно-хвильових процесів для ліквідації ускладнень при бурінні / О.В. Паневник, Р.С. Яремійчук, А.Г. Чернобильський. – Київ: Українська книга, 1998. – 211с.

46. Гогиш Л.В. Отрывные и кавитационные течения / Л.В. Гогиш, Г.Ю. Степанов. – М: Наука, 1979. – 536 с.

47. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика / Г.Н. Абрамович . – М.: Наука, 1969. – 824 с.

48. Белоцерковский С.М. Моделирование турбулентных струй и следов на основе метода дискретных вихрей / С.М. Белоцерковский, А.С. Гиневский. – М.: Физматлит, 1995. – 368 с.

49. Гиневский А.С. Теория турбулентных струй и следов / Гиневский А.С. – М.: Машиностроение, 1969. – 400 с.

50. Антонов А.Н. Пульсации давления при струйных и отрывных течениях / Антонов А.Н., Купцов В.М., Комаров В.В. – М.: Машиностроение, 1990. – 272 с.

51. Kermeen R.W., Mac Graw Y.T., Parkin B.R. Mechanism of Cavitation Inception and the Related Scale Effects Problem / Kermeen R.W., Mac Graw Y.T., Parkin B.R., Transactions of the ASME, 77, 1955.

52. Зарембо Л.К., Красильников В.А. Введение в нелинейную акустику / Л.К. Зарембо, В.А. Красильников. – М.; 1966. – 519 с.

53. Леонов Е.Г., Исаев В.И. Гидромеханика в бурении / Е.Г. Леонов, В.И. Исаев. – М.: Недра, 1987. – 304 с.

54. Ландау Л.Д., Лившиц Е.М. Гидродинамика / Л.Д. Ландау, Е.М. Лившиц. – М.: Наука, 1986. – 733 с.

55. Дин Р. Образование пузырей / Вопросы физики кипения / Дин Р. – М.: Мир, 1964. – 188 с.

56. Несик Е.И. Кипение жидкости / Несик Е.И. - М.: Наука, 1978. – 154 с.

57. Френкель Я.И. Кинетическая теория жидкостей / Френкель Я.И. –М. - Л.: Издательство АН СССР (Сб. избр. тр / т.3), 1959. – 359 с.

58. Рахматулин Ш.И. Кавитация в гидравлических системах магистральных нефтепроводов / Рахматулин Ш.И. - М.: Недра, 1986. – 123 с.
59. Федоткин И.М., Немчин А.Ф. Использование кавитации в технологических процессах / И.М.Федоткин, А.Ф.Немчин. - К.: «Вища школа», 1984. – 68 с.
60. Гупта А., Лилли Д., Сайред Н. Закрученные потоки / Гупта А., Лилли Д., Сайред Н. ; пер. с англ. – М.: Мир, 1987. – 588 с.
61. Абрамович Г.Н., Гиршович Т.А., Крашеников С.Ю., Секунцов А.Н., Смирнова И.П. Теория турбулентных струй / [Абрамович Г.Н., Гиршович Т.А., Крашеников С.Ю. и др.]; изд-е 2-е перераб. и доп. – М.: Наука, 1984. – 717 с.
62. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика / Абрамович Г.Н. – М.: Наука, изд-е 3-е перераб. и доп., 1969. – 824 с.
63. Абдураманов А.А. Механика вихревых и винтовых потоков жидкости и ее приложение в гидротехнике. Ч.1. / Абдураманов А.А. – Ташкент: Джанбульский гидромелиоративно-строительный ин-т, 1982.–81 с.
64. Теория турбулентных струй / Абрамович Г.Н., Гиршович Т.А., Крашеников С.Ю., Секунцов А.Н., Смирнова И.П. – М.: Наука, изд-е 2-е перераб. И доп., 1984. – 717 с.
65. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя / Шлихтинг Г. пер. с нем. – М.: Наука, 1974. – 711 с.
66. Яворский Б.М. Справочник по физике для инженеров и студентов вузов / Б.М. Яворский, А.А. Детлаф. – М.: Наука, 1977. – 944 с.
67. Зайцев О.Н. Теоретические исследования устойчивости закрученных потоков при прецессии вихревого ядра.// Вісник ОДАБА.- Одеса: ОДАБА. – 2002. - №8. – С. 68-71.
68. Зайцев О.Н. Влияние степени крутки на устойчивость структуры закрученного потока в теплогенерирующих установках / О.Н. Зайцев // Управління ефективним енерговикористанням: матеріали 5-ої міжнародної наук.-практ. конф., Одеса: Головне управл. ЖКГЕЕ. – 2003. - С.73-75.
69. Зайцев О.Н. Исследование прецессии вихревого ядра в закрученном

потоке газа / О.Н. Зайцев // Химия, химическая технология и экология. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2002. – №2. – Т. 2. – С.43-46.

70. Фем'як Я.М. Підвищення ефективності руйнування гірських порід / Я.М. Фем'як, Р.С. Яремійчук, Я.Я. Якимечко // Нафтова і газова промисловість. – 2001. – №2. – С. 16 – 17.

71. Френкель Я.И. Кинетическая теория жидкостей / Френкель Я.И. – М.-Л.: Издательство АН СССР, 1959. – 359 с – (сб. избр. тр./ т.3).

72. Яремійчук Р.С. Руйнування гірських порід при кавітаційному бурінні свердловин / Р.С. Яремійчук, Я.М. Фем'як, Я.Я. Якимечко // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – Івано-Франківськ: ІФДТУНГ. – Вип. 36. - Т. 2. – 2000. – С. 33 – 37.

73. Антонов А.Н Пульсации давления при струйных и отрывных течениях / Антонов А.Н., Купцов В.М., Комаров В.В. – М.: Машиностроение, 1990.–272 с.

74. Симкин Э.М., Лопухов Г.П. Виброволновые и вибросейсмические методы воздействия на нефтяные пласты / Э.М. Симкин, Г.П. Лопухов // Нефтепромысловое дело: обзор. информ. – М., 1985. - Вып. 15. – 32 с.

75. Сиротюк М.Г. Экспериментальные исследования ультразвуковой кавитации // Мощные ультразвуковые поля / Под ред. Розенберга. – М.: Наука, 1968. – С. 167-220.

76. Taleyarkhan R. P., West C. D., Cho J. S. Lahey R. T. (jr), Nigmatulin R. I., Block R. C. Evidence for nuclear emissions during acoustic cavitation // Science.– 2002.– P. 1868–1873.

77. Симкин Э.М., Соколов Л.В. Влияние акустического поля на реологические свойства нефтей / Тр. ин-та / М., ВНИИЯГГ. - 1981. - С. 60-63.

78. Сургучев М.Л. Вторичные и третичные методы увеличения нефтеотдачи пластов. - М.: Недра, 1985. - 308 с.

79. Ефимова С.А., Сургучев М.Л. и др. Регулирование эффективной теплопроводности коллекторов в акустическом поле / С.А. Ефимова, М.Л. Сургучев и др. // Нефтяное хозяйство. – 1975. - № 4. – С. 52-55.

80. Патент 36439А Україна, МКП В06В1/20. Гідродинамічний кавітатор /

Р.С. Яремійчук, Т.Р. Шандровський, Я.Я. Якимечко; заявники і патентовласники: Р.С. Яремійчук, Т.Р. Шандровський, Я.Я. Якимечко. - № 99126895; заявл. 17.12.1999; опубл. 16.04.2001, Бюл. № 3.

81. Якимечко Я.Я. Стендові випробування гідродинамічного пристрою-пульсатора та його вплив на параметри товарної нафти / Я.Я. Якимечко // Нафтова і газова промисловість. – 2009. - № 5-6. – С. 16 – 17.

82. Якимечко Я.Я. ІФНТУНГ – Нафтогазова енергетика – 2011 / Я.Я. Якимечко, Я.М. Фем'як, С.О. Овецький, І.Я. Яремко // Вплив пульсацій тиску, створених гідродинамічним кавітатором, на параметри нафти: Міжнар. наук.-техн. конф., Івано-Франківськ, 10-14 жовтня 2011 р. : тези допов. і повідомл. – Івано-Франківськ, 2011. – С. 48

83. Яремійчук Р.С. Применение струйных аппаратов при освоении скважин / Яремійчук Р.С., Кифор Б.М., Лотовский В.Н., Шанович Л.М. // Техника и технология бурения скважин: обзор. информ. – М.: ВНИОЭНГ, 1988. – 56 с.

84. Яремійчук Р.С. Применение струйных аппаратов при интенсификации притока нефти / Р.С. Яремійчук, А.А. Джавадян // Нефтяное хозяйство. – 1988. - № 5. – С. 37-40.

85. Яремійчук Р.С. Технология повышения продуктивности скважин с помощью струйных аппаратов / Яремійчук Р.С., Возный В.Р., Кифор Б.М., Лотовский В.Н. // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море: обзор. информ. – М.: ВНИОЭНГ, 1992. – 52 с.

86. А. с. 1332086 СССР, МКИ F 04 F 5/54. Скважинная насосная установка / Р.С. Яремійчук, Б.М. Кифор, В.Н. Лотовский, В.И. Арцеховский, М.Г. Храбратин, С.Н. Горев, Г.А. Лесовой, К.Г. Донец (СССР). - № 4020533/25-06; заявл. 06.02.86; опубл. 23.08.87, Бюл. № 31.

87. А. с. 1474339 СССР, МКИ F 04 F 5/14. Струйный насос / А.М. Абдулзаде, Р.С. Яремійчук, А.И. Спивак, С.Б. Назаров (СССР). - № 4304842/25-29; заявл. 08.09.87; опубл. 23.04.89, Бюл. № 15.

88. А. с. 1481485 СССР, МКИ F 04 F 5/02. Струйный насос / А.М. Абдулзаде, Р.С. Яремійчук, А.И. Спивак, Н.А. Ефимов (СССР). - № 4302914/25-

29; заявл. 08.09.87; опубл. 23.05.89, Бюл. № 19.

89. А. с. 1551840 СССР, МКИ F 04 F 5/54. Скважинная насосная установка / Р.С. Яремийчук, И.В. Белей, Ю.С. Лопатин, М.Г. Храбатин, В.Д. Холодюк, А.А. Домальчук (СССР). - № 4449704/25-29 ; заявл. 29.06.88 ; опубл. 23.03.90, Бюл. № 11.

90. А.с. 1701992 СССР, МКИ F 04 F 1/20. Устройство для добычи нефти / М.Г. Храбатин, Р.С. Яремийчук, М.Н. Томин, В.Д. Холодюк (СССР). - № 4661478/29 ; заявл. 13.03.89 ; опубл. 30.12.91, Бюл. № 48.

91. Яремийчук Р.С. Вскрытие продуктивных горизонтов и освоение скважин / Р.С. Яремийчук, Ю.Д. Качмар. – Львов: Вища школа. - 1982.-150 с.

92. Яремийчук Р.С. Освоения свердловин: Практикум / Р.С. Яремийчук, Ю.Д. Качмар. – Львів: Світ, 1997. – 256 с.

93. Яремийчук Р.С., Возний В.Р. Освоения та дослідження свердловин / Р.С. Яремийчук, В.Р. Возний. – Львів: Оріяна-Нова, 1994. – 440 с.

94. Подземная гидравлика / К.С. Баскиев, А.И. Власов, И.Н. Кочина, В.М. Максимов. – М.: Недра, 1986. – 303 с.

95. Гиматутдинова Ш.К. Справочная книга по добыче нефти / Ш.К. Гиматутдинова. – М.: Недра, 1974. – 704 с.

96. Справочное руководство по проектированию разработки и эксплуатации нефтяных месторождений // Добыча нефти / Под ред. Ш.К. Гиматутдинова. – М.: Недра, 1983.- 455 с.

97. Савенков Г.И., Бойко В.С. Расчет процессов интенсификации притока, освоения и эксплуатации скважин / Г.И. Савенков, В.С. Бойко. – Львов.: Вища школа, 1986. – 160 с.

98. Савенков Г.И. Совершенствование технологии процесса освоения скважин сжатым газом: автореф. дис. на присвоение науч. степени канд. техн. наук: спец. 05.15.10 “Бурение скважин” / Г.И. Савенков. - Ивано-Франковск, 1986. – 22, [1] с.

99. Сборник задач по технологии и технике нефтедобычи / Н.Т. Мищенко, В.А. Сахаров, В.Г. Грон, Г.И. Богомольный. – М.: Недра, 1984. – 272 с.

100. Соколов Е.Я. Струйные аппараты / Е.Я. Соколов, Н.М. Зингер. 2-е изд., перераб. – М.: Энергия, 1970. – 288 с.
101. Шуров В.И. Технология и техника добычи нефти / Шуров В.И. – М.: Недра, 1983. – 510 с.
102. Добыча тяжелых и высоковязких нефтей / Аметов И.М., Байдинов Ю.Н., Рузин Л.М., Спиридонов Ю.А. – М.: Недра, 1985. – 205 с.
103. Временная методика проектирования эксплуатации скважин струйными насосами с использованием фонтанного эффекта. Яремийчук Р.С., Савенков И.Г., Ивано-Франковск, 1991. – 21 с.
104. Інтенсифікація припливу вуглеводнів у свердловину: [наукове видання, книга перша] / Ю.Д. Качмар, В.М. Світлицький, Б.Б. Синюк, Р.С. Яремійчук. – Львів: Центр Європи. 2004. – 352 с.
105. Інтенсифікація припливу вуглеводнів у свердловину: [наукове видання, книга друга] / Ю.Д. Качмар, В.М. Світлицький, Б.Б. Синюк, Р.С. Яремійчук. – Львів: Центр Європи. 2004. – 414 с.
106. Совершенствование методов защиты колонны НКТ от асфальто-смолопарафиновых отложений на промыслах Татарстана / Н.Г.Ибрагимов // Нефтяное хозяйство. – 2005.– № 6, с. 110 – 112.
107. Добыча и промысловый сбор парафинистых нефтей / Волков Л.Ф., Каган Я.М., Латыпов В.Х. и др. – М. : Недра, 1970.
108. Два вида парафина, выпадающего на подземном оборудовании скважин в процессе добычи нефти / Б.П.Минеев, О.В.Болигатова // Нефтепромысловое дело. – 2004.– № 12, с. 41 – 43.
109. Патент 57331 Україна, МПК F04F 5/00 E21B 37/00. Спосіб роботи насосно-ежекторної свердловинної струминної установки з гідродинамічним пульсатором для видобування високов'язких нафт/ Р.С. Яремійчук, Я.Я. Якимечко, Т.Р. Шандровський: заявники і патентовласники Р.С. Яремійчук, Я.Я. Якимечко, Т.Р. Шандровський. - № u2010 08424; заявл. 05.07.2010; опубл. 25.02.2011. Бюл. № 4.

Для нотаток

Наукове видання

ЯКИМЕЧКО Ярослав Яремович
ЗАЙЦЕВ Олег Миколайович
ЧУДИК Ігор Іванович
ФЕМ'ЯК Ярослав Михайлович
ФЕДИК Остап Михайлович

**УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ
ВИДОБУВАННЯ ВИСОКОВ'ЯЗКИХ НАФТ
СТРУМИННИМИ НАСОСАМИ
З ВИКОРИСТАННЯМ КАВІТАЦІЙНИХ
ПРОЦЕСІВ**

Монографія

Друкується в авторській редакції

Підп. до друку 17.11.2022 р.
Папір офс. Офс. друк. Формат 60x84/16
Гарнітура Times New Roman. Умов. друк. арк. 8,13
Наклад 300 прим. Зам. 5372

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи
до державного реєстру видавців, виготівників і розповсюджувачів
видавничої продукції –
Серія ДК № 2509 від 30.05.2006 р.

Друк ПП «ПОСВІТ»
Адреса: вул. І. Мазепи, 7, м. Дрогобич, 82100 Україна
тел.: (03244) 2-23-35, 3-38-50.
E-mail: posvit-druk@ukr.net, posvitdruk@gmail.com

