МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ КОМП'ЮТЕРНОЇ ФІЗИКИ ТА ЕНЕРГЕТИКИ
Кафедра фізики нетрадиційних енерготехнологій та екології

Пояснювальна записка

До дипломної роботи

за освітньо-професійним рівнем «магістр»

«УЛЬТРАЗВУКОВИЙ ВПЛИВ ЯК ФАКТОР ЗНИЖЕННЯ ЕКОЛОГІЧНИХ РИЗИКІВ ПРИ ТРУБОПРОВІДНОМУ ТРАНСПОРТУВАННІ ВУГЛЕВОДНІВ»

Виконав: студент 2 курсу, групи НФ-61

Кравчук М.Ю.

Спеціальність:

105 Прикладна фізика та наноматеріали

Освітня програма:

Прикладна фізика нетрадиційної енергетики

Керівник: Пеліхатий М.М.

Рецензент:

Харків 2021

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

Інститут Навчально-науковий інститут комп'ютерної фізики та енергетики
Кафедра фізики нетрадиційних енерготехнологій та екології
Рівень вищої освіти (освітньо-кваліфікаційний рівень) магістр
Спеціальність 105 «Прикладна фізика та наноматеріали»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ __

підпис ініціали,прізвище

"" 2021 року

З А В Д А Н Н Я

НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ (ПРОЕКТ)

Кравчуку Микиті Юрійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові студента)

1. Тема роботи Ультразвуковий вплив як фактор зниження екологічних ризиків при трубопровідному транспортування вуглеводнів.

керівник роботи Пеліхатий Миколай Михайлович., д-р. фіз-мат. наук, проф.

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

затверджені наказом по університету від “_____” _____ 20___ року №_____

2. Строк подання студентом роботи 2021 року

3. Перелік питань, які потрібно розробити:

Обґрунтувати мету дослідження ультразвукового впливу як фактору зниження екологічних ризиків при трубопровідному транспортуванні вуглеводнів; визначити об’єкт та предмет дослідження; визначити екологічні ризики при трубопровідному транспортуванні вуглеводнів; визначити методи ультразвукового впливу на зменшення екологічних ризиків при трубопровідному транспортуванні вуглеводнів; розробити ефективну модель, здатну на основі ультразвукових технологій впливати на зменшення аварійності нафтопроводів, описати ефективність запропонованої моделі.

4. План роботи

№ з/п	Назви етапів роботи
1	Стан вивчення впливу ультразвукового випромінення на транспортувальні властивості нафти.
2	Дослідження методів впливу ультразвукового випромінення на транспортування нафти в нафтопроводі.
3	Аналіз результатів дослідження впливу ультразвукового випромінення на транспортування нафти в нафтопроводі.
4	Шляхи зменшення екологічних ризиків при трубопровідному транспортуванні вуглеводнів.

5. Дата видачі завдання_____

Студент _____ Кравчук М. Ю.
підпис ініціали,прізвище

Керівник роботи _____ Пеліхатий М. М.
підпис ініціали,прізвище

РЕФЕРАТ

Дипломна робота «Ультразвуковий вплив як фактор зниження екологічних ризиків при трубопровідному транспортуванні вуглеводнів» містить 50 сторінки, 4 розділи, 1 таблиці, 10 рисунків та використано 18 літературних джерел.

Мета роботи: опис методів впливу ультразвуку на характер перебігу вуглеводневої сировини та створення ефективної моделі, здатної використовувати ультразвукові технології.

З кожним роком обсяг транзиту нафти через територію України зростає. Але існуючі технології збільшення обсягів транспортування нафти також збільшують аварійність нафтопроводів. Від безперебійної роботи трубопроводів залежить як стабільна робота секторів економіки, а й екологічна безпека територій, прилеглих до нафтопроводів.

Предмет дослідження: методи зниження екологічної небезпеки під час трубопровідного транспорту вуглеводнів.

Методи дослідження: польові, лабораторні та статистичні.

Ключові слова: небезпека навколишнього середовища, ультразвукове випромінювання, кавітація.

ABSTRACT

The thesis "Ultrasound impact as a factor of reducing environmental risks in the pipeline transportation of hydrocarbons" contains 50 pages, 4 sections, 1 tables, 10 figures and 18 sources of literature used.

Purpose: to describe the methods of ultrasound influence on the nature of the flow of hydrocarbons and create an effective model capable of using ultrasonic technology.

Every year the volume of oil transit through the territory of Ukraine increases. But existing technologies to increase oil transportation also increase the failure of oil pipelines. Not only the stable operation of economic sectors but also the environmental safety of the areas adjacent to the oil pipelines depends on the uninterrupted operation of the pipelines.

Subject of research: methods of reducing environmental hazards during the pipeline transport of hydrocarbons.

Research methods: field, laboratory and statistical.

Key words: environmental hazard, ultrasonic radiation, cavitation.

ЗМІСТ

ВСТУП…..……...8
РОЗДІЛ 1. ВПЛИВ УЛЬРАЗВУКОВОГО ВИПРОМІНЕННЯ НА ВЛАСТИВОСТІ ТРАСПОРТУВАННЯ НАФТИ……..10
1.1 Характеристика системи транспортування нафт в України…….....10
1.2 Екологічні ризики при трубопровідному транспортуванні вуглеводнів…….……12
1.3 Ультразвукові методики впливу на нафту…….…..16
РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ВПЛИВУ УЛЬТРАЗВУКУ НА ТРАНСПОРТУВАННЯ НАФТИ В НАФТОПРОВОДІ…..…….....23
РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ ДАННИХ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВИПРОМІНЕННЯ НА ТРАНСПОРТУВАННЯ НАФТИ ……...……..28
РОЗДІЛ 4. ШЛЯХИ ЗМЕНШЕННЯ РИЗИКІВ ДЛЯ ЕКОЛОГІЇ ПРИ ТРУБОПРОВІДНОМУ ТРАНСПОРТУВАННІ ВУГЛЕВОДНІВ.……..44
ВИСНОВКИ……..……46
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ…….……...49

ВСТУП

Забруднення від нафти та нафтопродуктів – глобальна екологічна проблема. Тільки Росії втрати сирої нафти становлять до 5% від загального обсягу видобутку. Зокрема, випуск нафтопродуктів залізницею становить не менше 330 млн т/рік, на нафтобазах – 80 млн т/рік, на НПЗ до 100 млн т/рік. У світовій практиці для очищення навколишнього середовища від нафтових вуглеводнів переважно використовуються механічні, термічні, фізико-хімічні та хімічні процеси. Способи, пов'язані із переміщенням забруднених нафтою субстратів, особливо небажані. До основних недоліків всіх вищезазначених методів можна віднести високу вартість, складну апаратну конструкцію процесу, можливість забруднення субстратів миючими та ополіскуючими розчинами та руйнування природної біоти, що перешкоджає здійсненню самоочищення. процесів, тому що у складі олії понад 1000 окремих органічних речовин.

Елементний склад нафти включає від 83 до 87% вуглецю, від 12 до 14% водню, від 0,5 до 5,0% сірки, від 0,02 до 1,7% азоту та від 0,005 до 3,6% кисню та невелику суміш мінеральних сполук.

Наявність у ґрунті сирої нафти значно погіршує її властивості (структуру, кислотність, гідрофобність, наявність водостійких агрегатів) та знижує її екологічні функції. 1. Токсичність окремих компонентів олії. Нафту, отриману безпосередньо зі свердловини, можна класифікувати за кількома критеріями. Сира нафта найчастіше класифікується за місцем походження, відносною вагою, в'язкістю та вмістом сірки. Розрізняють легку (0,65 – 0,87 г/см3), середню (0,871 – 0,910 г/см3) та важку (0,910 – 1,05 г/см3) нафту. Кожен вид сирої нафти має унікальні властивості. Хоча сира нафта, що видобувається на різних родовищах, містить одні й ті ж хімічні компоненти, вона відрізняється за часткою алканів, циклоалканів, ароматичних вуглеводнів та нафтенів.

Алкани, лінійні або розгалужені, містять лише вуглець та водень; в порівнянні з іншими вуглеводнями мають найменшу токсичність; однак

низькомолекулярні легколеткі алкани дуже токсичні для рослин та тварин. Гострий токсичний ефект олії у перші дні після розливу у пляшки пов'язаний саме з наявністю дуже летких низькомолекулярних алканів. Циклоалкани – це насичені вуглеводні з одним або декількома молекулярними кільцями. Ароматичні вуглеводні – це ненасичені вуглеводні з одним або декількома бензольними кільцями. Вони є одними з найтоксичніших компонентів нафти. Багато ароматичних вуглеводнів канцерогени та мутагени. Найнебезпечніша група поліароматичних вуглеводнів. Парафіни можуть міститися у всіх групах масел у кількості до 20%. За вмістом парафінів розрізняють олії з низьким вмістом парафінів (парафін – до 1,5%), парафінові (1,5 – 6,0%) та високопарафінові (більше 6%). Нафта, що видобувається на ставропольських та грозненських родовищах, парафінова. На додаток до вищезгаданих сполук, олії, мабуть, містять: смоли, асфальтени, фенантрен, хризени, пірени, бензпірени та тетрафени. Смоли та асфальтени відіграють важливу роль у реакційній здатності нафти. Їхній вміст коливається від 1-2 до 6-40%. Основна частина мікроелементів олії пов'язана з цими групами сполук. Найвищі концентрації важких металів: V і Ni, а деяких родовищах нафти, газу і вуглеводнів також високий вміст токсичних Hg і As. Тому сира нафта та нафтопродукти неминуче містять токсичні компоненти, що негативно впливають на природні об'єкти.

Для того що дійти мети необхідно розрішиті наступні завдання:

- Визначити характеристики впливу випромінювання ультразвуком на реологічні характеристики вуглеводнів;

- Визначення особових критеріїв зменшення ризиків для екології при транспортуванні вуглеводнів;

- Зробити модель на засадах впливу ультразвуком, що відповідає критеріям зменшення ризиків для екології ;

- Зробити математичних опис моделі.

Об'єкт дослідження – методики зменшення ризиків для екології при транспортуванні вуглеводнів.

Предмет дослідження – дія ультразвуком як зниження ризиків для екології при транспортуванні вуглеводнів.

Методи дослідження – статистичні методи.

РОЗДІЛ І. ВПЛИВ УЛЬРАЗВУКОВОГО ВИПРОМІНЕННЯ НА ВЛАСТИВОСТІ ТРАСПОРТУВАННЯ НАФТИ

1.1 Характеристика системи транспортування нафт в України

Будівництво трубопроводів в Україні почалося в 1960-х роках. Перший український нафтопровід «Долина-Дробобич» пропускною здатністю 58,4 км було побудовано в 1962 році транспортною компанією. Це було лідером в операції Північної долини потомство. Відмітна індивідуальність цього трубопроводу – це та, яка спричинить великий трафік у країні. Також є трубопровід, перша нитка «Команди» в районі Мози-Брод-Ужгород, очолювана 1962 року[2].

Його скупченість на території України становить 684 км/год. Транспортні компанії дбають один про одного, а в місті Брод є місце для транспорту. Прогнозована початкова потужність газопроводу в Україні досягла 17,5 млн. т/рік, східні - 8,5 млн тонна/рік

Трубопровод повинен був транспортувати татарську, башкірську та западносибірську нафту на експорт у Венгрию, бившую Чехословакію, а також транспортувати нафту в Броди по залізному дорогі на експорт через перевалочні комплекси в Одессе та Рені.

Друга нитка «Єпархії», довжиною 686,5 км і діаметром 720 мм в Україні та сімома непереможними трибунами, З введенням другої нитки загальна потужність проекту в експлуатації газопроводу «Кооператив» в українській державі становить 55 років. т/рік, виробництво – 26,5 млн тонна/рік З відкриттям нефтяних місць на сході України (Леляківське, Гнідинцовське, Прилукське в Чернігівській областях, Качанівське, Бельське та Рибальське в Полтавській області) та вводом в експлуатацію Кременчузького НПЗ у 1966

році «Мала Павлівка - Глинсько-Розбишевська». «Розбишевська – Кременчук».

З додаванням витягів на локаціях у Чернігівській обл. У 1972 році була побудована друга нітка нефтепровода Гнединці-Глинське-Разбишевская діаметром 377 мм, а також нефтепровод Кременчуг-Херсон довжиною 355,6 км і діаметром 720 мм. Увеличение мощностей по переработке нефти на Кременчугском и Херсонском НПЗ поставило питання про будівництво нефтепровода Мичуринск (Тамбовская область, Россия) - Кременчук. Загальна пропускна здатність цього газопроводу становить 757 км (на таку територію України – 540 км) при 720 км у 1974 році. Потужність проекту становить 18 млн. тонна/рік [2].

Наприкінці 1975 року на 45-й АЕС розташовувався водопровід Лихенової АЕС. У зв'язку зі збільшенням добычи нафти в Західній Сибірі та необхідністю збільшення експортних можливостей поставок нафти через нафтопереробні заводи в містах Одеса та Новоросійська (Росія), а також відповідних можливостей установок нафти на Одеському нафтопереробному заводі. Що стосується трубопровідного транспорту, то в 1977-1977 рр. було побудовано та введено в експлуатацію Самосканза-Сасе У цьому районі модернізовано нафтопровод Тихорецьк-Лисичанськ для транспортування сирої нафти з Лисанська.

З метою диверсифікації поставок нафти на українські НПЗ та розширення транзитних можливостей України в 1993 році було проведено техніко-економічне обґрунтування будівництва терміналу морського нафтотранспортного комплексу (МТК) потужністю 40 млн. грн. тон/одод Одеса (порт), у 1994 році завершено розробку проекту будівництва першого терміну. т/рік, у 1995 р. розпочато будівництво газопроводу Одеса-Броде. Будівництво Південного нафтового дедлайну було завершено в грудні 2001 року, а поразка Одеса-Броди — у 2002 році.

У 1985 році на території України введено в експлуатацію другу нитку Техорсько-Лисичанської єпархії 720 метрів. Загальна потужність цих

трубопроводів від Лисичанська до Тихорецька з четирьмя нефтеперекачивающими станціями (дві з яких розташовані на території України) склала 34 млн тонн на рік.

З метою диверсифікації поставок нафти на українські НПЗ та розширення транзитних можливостей України в 1993 році було проведено техніко-економічне обґрунтування будівництва берегового нафтотранспортного комплексу (НТК) - термінал потужністю 40 млн. грн. тонна/рік . поблизу м. Одеса (порт), а в 1994 р. розробка проекту будівництва першого терміну терміналу 12 млн. грн. тоннажу, будівництво якого розпочато в 1995 році. Одесько-Бродська газова компанія. Будівництво Південного нафтового дедлайну було завершено в грудні 2001 року, а поразка Одеса-Броди — у 2002 році. Нафтопровід Одеса-Броди (реверсивний) був залишений у 2004 році. Вартість газопроводу становить 550 млн. Гривня була побудована в період з 1996 по 2001 рік. Поряд з планом він обслуговував транзит каспійської нафти в Східній і Центральній Європі [3].

1.2 Екологічні ризики при трубопровідному транспортуванні вуглеводнів

На жаль, будь-яка діяльність людини тією чи іншою мірою призводить до забруднення та зміни екологічної ситуації у сфері її діяльності. І діяльність із забезпечення енергією цивілізації – не виняток. Видобуток, транспортування, переробка та використання нафти, що приносять людству незаперечні переваги, а також не без серйозних наслідків для довкілля. Бурхливий розвиток автомобільної промисловості приніс людям безпрецедентну мобільність і докорінно змінив наш спосіб життя. Кожна людина має власний автомобіль. Загалом масова автомобілізація призводить до серйозних негативних екологічних наслідків.

Парк автомобілів, що використовуються у всьому світі, вже давно перевищує 1 мільярд автомобілів. І всі ці автомобілі щодня спалюють величезну кількість палива та виділяють стільки ж вихлопних газів.

Треба сказати, що міський зміг - це явище, з яким люди у великих містах зіткнулися ще з епохи масового використання вугілля як паливо. Але в епоху вугілля було швидко виявлено причину смогу (змішування диму та діоксиду сірки) і були розроблені способи її вирішення (переведення промислових підприємств з вугілля на природний газ). Причина появи смогу за відсутності вугледобувних виробництв залишалася загадкою. Хааген-Сміт, професор Каліфорнійського технологічного інституту, поклав край усім суперечкам.

Саме він з'ясував причину та описав утворення смогу нового типу – фотохімічного. Основною причиною цього смогу називали продукти неповного згоряння палива у двигунах автомобілів. Вихлопні гази автомобілів, змішуючись з озоном, парами вуглеводневмісних продуктів і перекисом нітрату під впливом сонячних променів, утворюють цей отруйний серпанок, від якого починають хворіти легені [5].

Забруднення повітря - єдине наслідок повсюдного використання нафти. Споживання нафти та нафтопродуктів може забруднювати повітря з кількох причин. Сьогодні багато вчених сходяться на думці, що гази, що викидаються в атмосферу при видобутку та використанні нафти, значно посилюють парниковий ефект. Парникові гази, накопичуючись у верхніх шарах атмосфери, сприяють підвищенню температури на поверхні планети. Основними парниковими газами (у порядку впливу) є водяна пара, вуглекислий газ, метан, озон. На думку вчених, потепління, що спостерігається в останні десятиліття, в основному викликане збільшенням концентрації вуглекислого газу в атмосфері Землі. Крім того, більша частина вуглекислого газу утворюється внаслідок діяльності людини.

Глобальне потепління, тобто поступове підвищення атмосфери Землі, може призвести до катастрофічних наслідків. Очікується, що танення льодовиків призведе до підвищення рівня Світового океану, затоплення значної частини суші та збільшення кількості опадів. Відбудеться значна зміна клімату, внаслідок чого почастішають стихійні лиха, такі як повені, урагани, торнадо; їхня інтенсивність збільшиться. Треба сказати, що не всі вчені

погоджуються з концепцією глобального потепління, а деякі, погодившись із самим процесом потепління, відкидають вплив на нього факторів, спричинених діяльністю людини. Як би там не було, ідея зниження викидів парникових газів, зокрема спалювання мазуту, виглядає цілком розумною. Розвідка і транспортування нафти надають інші істотні на довкілля. Екологічні катастрофи на морі особливо небезпечні. Оскільки масло легше за воду, воно розтікається у воді у вигляді тонкої плівки. Розливи нафти пов'язані з масовою загибеллю морських ссавців, птахів та рептилій

Риболовля пошкоджена. Заповнені нафтою пляжі відлякують туристів і завдають непоправної шкоди прибережній екосистемі. Аварії танкерів у морі відбуваються від початку їхньої місії. Одна з найбільших аварій, що привернула велику увагу, сталася у 1989 році з нафтовим танкером Exxon Valdez. Танкер Exxon повинен був перевозити нафту з Аляски до Каліфорнії, але зненацька сів на мілину біля узбережжя Аляски і врізався в риф Блая. У результаті море виявилося 260 000 барелів нафти.

Хоча обсяг нафти, розлитої під час цієї катастрофи, був не найбільшим у серії інших морських аварій, збитки, завдані розлитою нафтою природній екосистемі Аляски, вважалися найбільш катастрофічними для того часу. Ця аварія тривалий час залишалася найруйнівнішою екологічною катастрофою, яка будь-коли відбувалася на морі. Але через 21 рік катастрофу з танкером Exxon Valdez затьмарила ще одна катастрофа. Тільки цього разу із танкером аварії не сталося. Морські аварії не обмежуються транспортуванням нафти. Морські платформи, з яких буряться і видобуваються свердловини, також спричиняють катастрофічні розливи нафти.

Найбільший техногенний розлив нафти в морі відбувся у 2010 році. Вибух на нафтовій платформі Deepwater Horizon спричинив найбільший розлив нафти на море в історії видобутку нафти.

Треба сказати, що нафта потрапляє у світовий океан у результаті випадкових розливів. Набагато більше нафти природним чином потрапляє у вододіли через розломи у земній корі. Природні виходи нафти існують у

багатьох частинах морів та океанів. За існуючих несправностей нафту має тенденцію поступово просочуватися у невеликих обсягах. Навколо цих нафтових виходів формується навіть власна екосистема. Небезпека техногенних розливів полягає в тому, що вони відбуваються за короткий термін і у великих обсягах. Вони порушують існуючу екосистему та призводять до масової загибелі морських жителів.

Ці та інші негативні фактори, що супроводжують широке використання нафти в сучасній цивілізації, викликають обґрунтовані побоювання та вимагають розробки заходів щодо їх запобігання та зниження їх негативного впливу.

Щоб знизити негативний вплив видобутку нафти на довкілля, у галузі дотримуються високих екологічних стандартів експлуатації. Щоб запобігти нещасним випадкам, компанії вводять нові стандарти продуктивності, які враховують минулий негативний досвід та розвивають культуру безпечної роботи. Розроблено технічні та технологічні заходи щодо запобігання аварійним ситуаціям. Вчені розробляють нові методи боротьби із забрудненням. Наприклад, використання спеціальних диспергаторів дозволяє прискорити збирання пролитої нафти з поверхні води. Штучно видалені бактеріодеструктори, розпорошені на масляну пляму, здатні швидко обробити масло, перетворивши його на безпечніший продукт. Також практикується спалювання олії з поверхні води[6].

Для боротьби із забрудненням парниковими газами розробляються різні технології уловлювання та використання вуглекислого газу. Державні органи запроваджують нові екологічні стандарти. Наприклад, стандарти, що регулюють вміст шкідливих речовин у вихлопних газах автомобілів. Ці стандарти спрямовані як на покращення двигунів автомобілів, так і на поліпшення властивостей палива, що виробляється. Наприклад, у Росії стандарт Євро-5 діє для всіх імпортних автомобілів із 1 січня 2014 року. Перехід на паливо стандарту Євро-5 забезпечено з 1 січня 2016 року.

1.3 Ультразвукові методики впливу на нафту

Розробка покладів важкої та дуже в'язкої нафти вже становить важливу частину видобутку нафти. Висока в'язкість і температура застигання, а також аномальні реологічні властивості цих олій ускладнюють їх вилучення та транспортування. Відповідно до Федерального закону № 261 «Про енергозбереження…» та «Енергетичну стратегію Росії на період до 2030 року» виявлення можливості зниження витрат на енергоресурси при видобутку та транспортуванні нафти є пріоритетним завданням. Таким чином, видобуток нафти вимагає використання нових технологій, які легко адаптуються, прості у використанні, мають низьку вартість та нульове забруднення нафтового пласта. З точки зору можливості керування впливом на продуктивний пласт, у тому числі на привибійну зону, особливо цікава технологія, яка базується на використанні ультразвукових хвиль.

При транспортуванні високов'язкого масла в даний час існує два основних напрямки: зниження в'язкості та зменшення тертя. Способи зменшення тертя включають кільцевий потік олії у воду та використання присадок. Серед способів зниження в'язкості – нагрівання, ультразвукова дія, емульгування олії у воді, розведення. Вплив ультразвуку, що використовується для регулювання реологічних властивостей високов'язких важких нафт, є найбільш ефективним із зазначених вище методів як з технологічної, так і з екологічної та економічної точки зору.

Проте слід зазначити, що результати досліджень з ультразвукової обробки нафти часто суперечать один одному через різні умови експериментів: акустичні установки відрізняються конструкцією та потужністю, різним часом обробки та температурою, а головне - об'єктами різного складу. Наприклад, було встановлено, що ультразвукова обробка нафти у свердловинах практично ефективна лише з 85%. Тому необхідні подальші дослідження, спрямовані на виявлення основних закономірностей,

що пояснюють реологічну поведінку та структурно-механічні властивості нафти після акустичного впливу.

Механізм зниження в'язкості при ультразвуковій обробці, на думку авторів, пояснюється зменшенням молекулярної маси довголанцюгового парафіну. Кристали воску розпадаються дуже дрібні частинки, які можуть перешкоджати подальшому зростанню великих кристалів. Властивості мастила, обробленого ультразвуком, також залежать від кількості парафінових вуглеводнів та компонентів смолистого асфальту.

Слід зазначити, що з високому вмісті цих компонентів спостерігається погіршення реологічних властивостей після акустичного впливу, що пояснюється утворенням парафінів тривимірної структурної сітки.

Структурні зміни, що відбуваються з часом, створюють методологічні проблеми для чіткої властивості якостей нафти. Крім того, слід зазначити, що присутність смоляних компонентів асфальту може призвести до реопексії сирої нафти. У той самий час показано, що у цілому є складну реологічну систему з тиксотропними властивостями. Метою дослідження було визначення ефективності ультразвукової обробки нафти, а саме вплив акустичного впливу на реологічні властивості різних зразків нафти (енергія активації в'язкої течії, температура застигання та ізотермічні криві прямої та зворотної течії при 20°). С) [8].

Потужність опромінення була постійною та становила 80 Вт. Час дії становив від 5 до 20 хвилин. Відведення тепла проводилося за допомогою термостата LOIP FT-311-25 (Росія), щоб унеможливити вплив температурного фактора, що виникає при ультразвуковому впливі. Зразки охолоджували до 25 ° С у зовнішньому склі з теплоізоляцією.

Таким чином, середня швидкість охолодження становила 2°С/хв. Температуру зразків визначали за допомогою віскозиметра RM-100 (Франція), оснащеного датчиком температури. Вага зразка вимірювалася на вагах CAS

MW-1200 (Південна Корея). Індекс щільності в градусах API розрахований на терезах HTR-220CE (Японія). Температуру застигання зразків олії визначали відповідно до стандарту ASTM D-97 – Стандартний метод випробування температури застигання нафтопродуктів.

Для дослідження реологічних властивостей зразків використовували роторний віскозиметр Physica MCR 102 на підшипниках повітряних виробництва Anton Paar (Австрія), систему пластина-пластина PP50. Діаметр плити 50мм. Така геометрія забезпечує рівномірний градієнт швидкості вимірювальному зазорі 1 мм. Оскільки температура суттєво впливає на в'язкість сирої нафти, її необхідно ретельно контролювати під час вимірів. У зв'язку з цим використовується система контролю температури, яка може підтримувати температуру в діапазоні від -40 до 200 ° C з точністю 0,01 ° C (пластина Пельтьє внизу реометра). Крім того, активний корпус Пельтьє H-PTD 200 використовувався як кришка для контролю температури верхньої частини вимірювальної системи. Цей метод зводить до мінімуму температурні градієнти у зразках та підтримує необхідну температуру. У ході експериментів на робочу повагу.

Температуру застигання зразків олії визначали відповідно до стандарту ASTM D-97 – Стандартний метод випробування температури застигання нафтопродуктів. Для дослідження реологічних властивостей зразків використовували роторний віскозиметр Physica MCR 102 на підшипниках повітряних виробництва Anton Paar (Австрія), систему пластина-пластина PP50. Діаметр плити 50мм. Така геометрія забезпечує рівномірний градієнт швидкості вимірювальному зазорі 1 мм.

Оскільки температура суттєво впливає на в'язкість сирої нафти, її необхідно ретельно контролювати під час вимірів. У зв'язку з цим використовується система контролю температури, яка може підтримувати температуру в діапазоні від -40 до 200 ° C з точністю 0,01 ° C (пластина Пельтьє внизу реометра). Крім того, активний корпус Пельтьє H-PTD 200

використовувався як кришка для контролю температури верхньої частини вимірювальної системи. Цей метод зводить до мінімуму температурні градієнти у зразках та підтримує необхідну температуру. У ході експериментів на робочу поверхню пластини реометра містилося близько 1963 мл проби.[7].

У нормальних умовах нафту і нафтопродукти є не молекулярні розчини, а дисперсні колоїдні системи. У процесі підготовки сировини контролю дисперсності нафтових систем використовуються такі методи: введення активуючих добавок і ПАР; розведення різними розчинниками у певній пропорції, використання електричних, магнітних та акустичних полів, механічний вплив тощо. буд. Обробка ультразвуком через кавітацію призводить до значного збільшення швидкості хімічних реакцій. А оскільки сама рідина при обробці практично холодна, розкладання цільових продуктів не відбувається; селективність процесу зростає[8].

На нашу думку, обробка ультразвуком здатна зруйнувати високомолекулярні молекули ПДВ лінійної структури та вуглеводні з довгими бічними ланцюгами, що призводить до появи вільних радикалів у рідині. [9]

Екологічні ризики при геофізичних дослідженнях Вплив на морські організми та екосистеми починається з геологічних та геофізичних досліджень морського дна з метою визначення його нафтогазоносності. Найчастіше використовувані методи сейсморозвідки. Морська сейсморозвідка заснована на генерації сейсмічних хвиль та реєстрації вібрацій, відображених від поверхні землі, що дозволяє оцінити структуру та нафтогазоносність осадових порід. Ефект гідроудару до 150 атм. призводить до загибелі або пошкодження органів та тканин дорослих риб та мальків. В області сейсморозвідки відомі випадки порушення міграційних шляхів лососевих риб. Шум, який створюється сейсмічними дослідженнями, руйнує морські організми, розпізнаючи інші звуки, спілкуючись один з одним і шукаючи їжу. Особливо це стосується китів. Бувають випадки, коли тварини, яких приваблюють

незнайомі їм звуки, зазнають тяжких і часто смертельних травм від сильного гідроудару.

Багато видів риб залишають райони дослідження. Хижаки теж переслідують їх і залишають свої улюблені житла. Однак деякі організми можуть існувати тільки в строго певних умовах, і багато з них помруть, не встигнувши звикнути до нового середовища. Екологічні ризики при бурінні свердловин Досвід великих морських нафтогазових проектів показує, що цей вид діяльності пов'язаний з великим обсягом викидів: в атмосферу, морське середовище і т. д. Навіть після припинення видобутку нафти або газу на родовищі екологічні ризики залишаються.

Морські викиди Буріння свердловин починається на етапі геолого-геофізичних досліджень на ділянках, де сейсморозвідка свідчить про наявність нафтогазових структур. Практично всі стадії та процеси при розвідці та видобуванні вуглеводнів супроводжуються скиданням рідких та твердих відходів. Обсяги цих скидів досягають 5000 кубічних метрів. для кожної пробуреної свердловини у вигляді відпрацьованих бурових розчинів і шламу, які є породами, пробуреними в стовбур свердловини. Рідкі відходи включають велику кількість токсичних забруднювачів, необхідних для злагодженої роботи бурового обладнання, важких металів, що утворюються при обробці гірських порід, і глинистих суспензій, які збільшують каламутність води в точках скидання. Найбільшу небезпеку є використання бурових розчинів на нафтовій основі[10].

Бруд, просочений таким розчином, є основним джерелом розливу нафти під час проведення бурових робіт. Ще одне значне джерело забруднення - скидання пластової води із свердловин. Що довше експлуатується родовище, то більше утворюється пластової води.

Вода, що видобувається, може бути повернута в море з попереднім очищенням або без неї або закачана в природні водоймища (свердловини). За законом використаний буровий розчин та інші відходи повинні збиратися та

вивозитися на берег для подальшої обробки або спеціальної очистки перед скиданням у море. Ці запобіжні заходи часто ігноруються. Нині відсутні ефективні технології переробки нафтопродуктів, а спеціалізовані сховища переповнені. Місцева дія відходів з колодязя відзначається в радіусі від 3 до 5 км, але якщо кількість колодязів досить велика, їх негативний вплив може «накрити» весь рибальський берег. Наприклад, за даними Норвезького інституту морських досліджень, нестача екосистеми Північного моря є результатом нафтогазової діяльності[13].

Розробка нафтових та газових родовищ та транспортування вуглеводневої сировини супроводжуються аварійними розливами нафти або хімікатів. Найчастішими причинами аварій є вихід з ладу обладнання, помилки персоналу та екстремальні умови довкілля. Вплив аварійних викидів на довкілля стає особливо гострим, коли вони відбуваються неподалік узбережжя чи районах з повільним водообміном. Аварії при бурінні – це несподівані викиди рідких та газоподібних вуглеводнів зі стовбура свердловини під час буріння, де проникають зони аномально високого тиску у колекторі.

У разі дуже великих падінь тиску, відмова буде катастрофічною у довгостроковій перспективі, і доведеться пробурити похилі свердловини, щоб зупинити викиди.

Інша група аварій – це регулярні «нормальні» викиди, які можна зупинити за лічені години без додаткового буріння. Небезпека таких викидів полягає саме в їхній регулярності, що в кінцевому підсумку призводить до хронічного впливу на морське середовище.

При тривалій експлуатації родовища сейсмічна небезпека цього регіону зростає, оскільки виснаження гірських порід відбувається великих площах. В результаті під тяжкістю гірничопромислового комплексу верхні шари гірських порід можуть обрушитися, що призведе до серйозних екологічних наслідків та людських жертв, а також сприятиме поширенню ударної хвилі та можливим

підземним поштовхам. області. . Екологічні ризики при транспортуванні нафти та газу. Для континентального шельфу Росії ризики, пов'язані з видобутком та транспортуванням вуглеводнів, набагато вищі, ніж у регіонах. Особливі кліматичні умови, тривалість дня, характер теплообміну поверхні океану з нижчими шарами та атмосферою, просторовий розподіл магнітних полів Землі, рельєф дна, типи берегів та мілководні припливи значно знизитимуть природну саморегуляцію навколишнього середовища[11].

У цьому сенсі розвиток інтенсивного судноплавства та створення морських виробництв у цьому регіоні потребує особливої уваги для забезпечення екологічної безпеки. Робота з видобутку та транспортування вуглеводневої сировини в прибережній зоні та на платформі різко збільшує ризики забруднення водного середовища на цих територіях, в основному через появу або навмисну утилізацію вироблених або транспортованих продуктів, а також палива та мастильні матеріали з бурових платформ, суден та сервісних механізмів, стічні води очисних споруд та побутові відходи. Ймовірність аварій з нафтовими танкерами, що розливають нафту в Північних морях, визначається: відносно невеликою середньою протяжністю транспортних маршрутів (менше 1000 км при середньосвітовій відстані понад 4500 км) [11];

• велика кількість вантажних операцій – навантаження на танкер-човник, перевалка танкерів-човників через плавучі термінали на експортні танкери, розвантаження у порту призначення;

• велика різниця у водотоннажності нафтоналивних танкерів - від 10 до 100 і більше тисячі тонн;

складні арктичні умови плавання.

Як показує статистика, транспортування нафти танкерами пов'язане з таким самим ризиком, як і прокачування підводними трубопроводами. 3 Аналіз даних про аварійні витоки за період 1974-2004 рр. Показує, що найважливіші проблеми безпеки та витоку виникають під час занурень на

водосховищі. термінали. На підставі аналізу аварій танкерів, що спричинили масштабні розливи нафти, були виділені такі основні типи:

• технічні збої;

• заземлення;

• зіткнення;

• Пожежі, вибухи.

Значні витоки призводять до аварій із наїздом та заземленням (20% - понад 700 тонн). Найбільш небезпечними з точки зору витоків є пожежі та вибухи, але частота їх виникнення не перевищує 1%.

Визначити фіксовані маршрути транспортування вуглеводнів арктичною платформою. Ці маршрути повинні бути прокладені досить далеко від узбережжя, щоб уникнути впливу на місця нересту риб та гніздових птахів. Для перевезення вуглеводнів на арктичній платформі використовуйте лише танкери з подвійним корпусом. Забезпечити наявність достатньої кількості добре обладнаних буксирів на всіх маршрутах для транспортування вуглеводнів на арктичній платформі. Забезпечити найкраще планування для запобігання та ліквідації аварійних розливів нафти (витоків газу) під час транспортування вуглеводнів на арктичному шельфі.

РОЗДІЛ ІІ. ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ВПЛИВУ УЛЬТРАЗВУКУ НА ТРАНСПОРТУВАННЯ НАФТИ В НАФТОПРОВОДІ

В даний час при видобуванні та транспортуванні нафти використовуються різні види ультразвукової обробки. Більшість робіт з акустичного впливу спрямована на поліпшення реологічних властивостей олії. Також після дії температура падає. затвердіння, інтенсифікували процеси його зневоднення, знесолення, сіроочищення, а також змінили вихід легких фракцій. Для виявлення залежності зміни в'язкості від амплітуди коливань

хвильового впливу було проведено серію експериментів з різними рідинами, у тому числі з високов'язкою нафтою Ашальчинського родовища. На малюнку можна побачити, що шар рідкого вуглеводню в центрі потоку, що не контактує зі стінками трубопроводу при ламінарному русі, рухається швидше, ніж шар, що контактує. Під дією ультразвукового випромінювання відбувається змішання шарів вуглеводневого потоку та створюється турбулентний режим потоку рідких вуглеводнів.

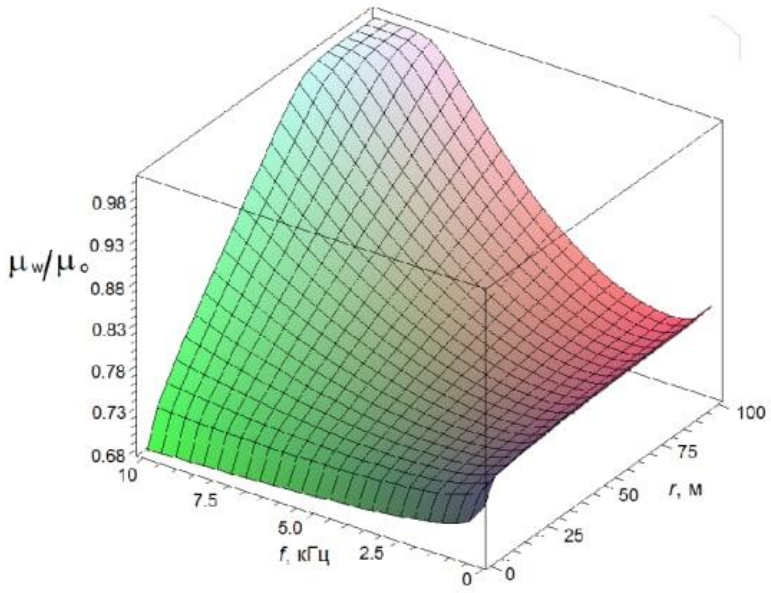


Рис.1. Залежність відносної в'язкості у пласті від частоти коливань хвильової дії та відстані від свердловини.

Конфігурація турбулентного характеру потоку вуглеводнів трубопроводом показано на наступному малюнку.

Як видно з малюнка, у турбулентному режимі перебігу вуглеводнів по трубопроводу швидкості шарів рідких вуглеводнів вирівнюються. Це відбувається через розвиток у рідині, через обробку ультразвуком, кавітації та внаслідок зменшення в'язкості речовини[17].

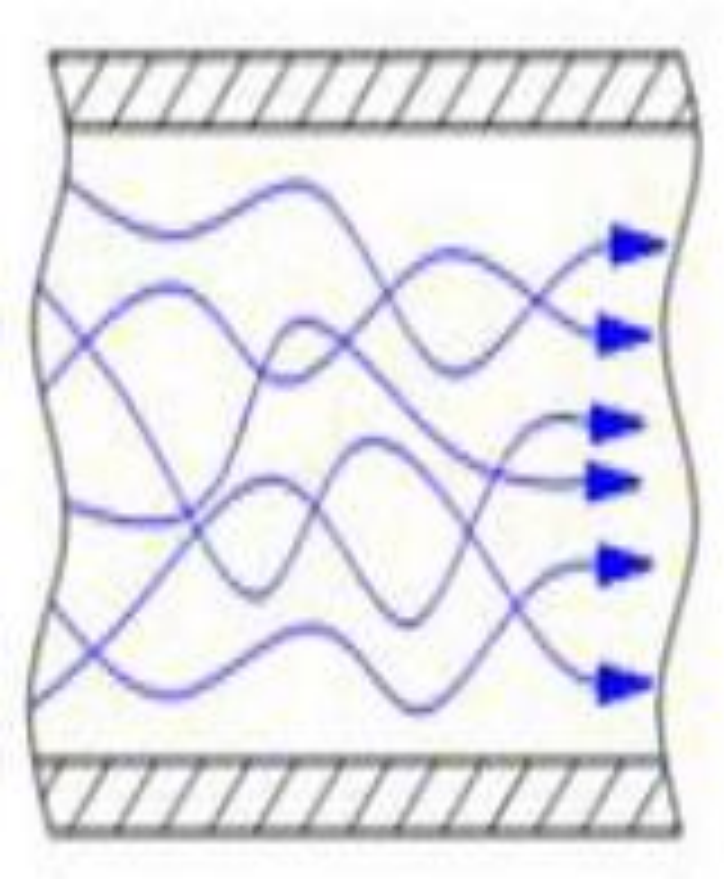


Рис. 2.Конфігурація турбулентного характеру течії рідких вуглеводнів у трубопроводі

У зв'язку з тим, що кавітація виникає в потоці рідких вуглеводнів в результаті дії ультразвукового випромінювача, розташованого поза трубопроводом, частина випромінювання поглинається самим трубопроводом, внаслідок чого найбільша інтенсивність кавітації хвильове поле знаходиться на стінках труби трубопроводу. В результаті при достатньої інтенсивності ультразвукового впливу можна отримати таку кількість кавітаційних бульбашок у найбільш інтенсивному полі хвилі кавітації, що призведе до відриву ламінарного підшару від турбулентного шару.

Ми використовували ультразвук підвищення продуктивності свердловини. Ефективність полягала в тому, що вплив на канали привибійної зони колектора викликав вимушені коливання стінок пористої структури пласта, які, у свою чергу, викликали постійний потік у в'язкій рідині, а це зниження опору рух рідини, тобто зменшення ефективної в'язкості, яку

демонструє рідина. Пластові рідини - нафта, газ, вода - можна знайти в порожнинах, порах та тріщинах гірських порід.

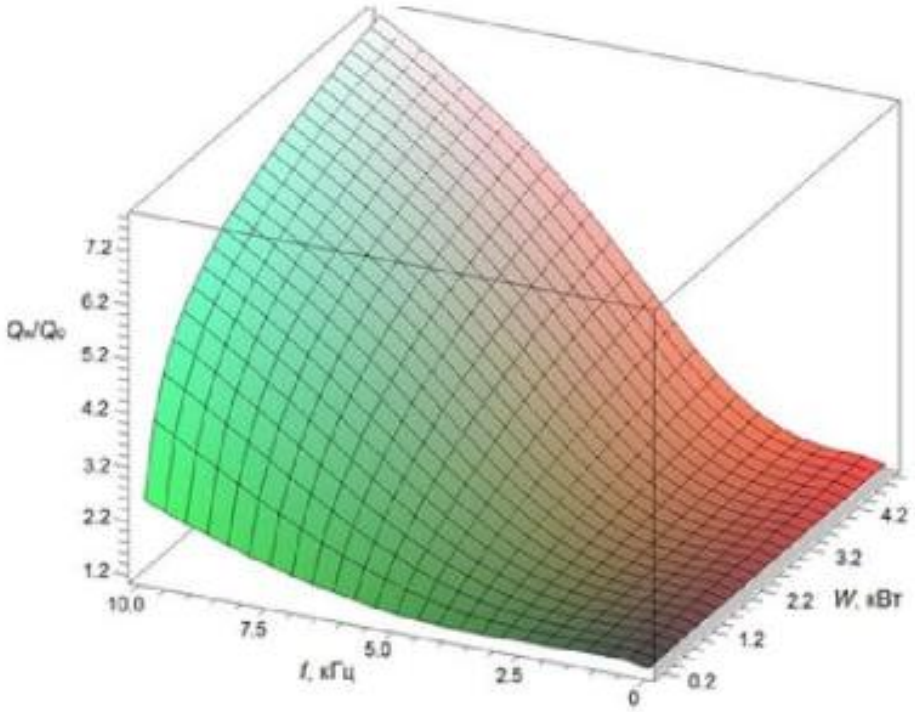


Рис. 3. Залежність відносного дебіту від частоти коливань та потужності
хвильового впливу.

Це означає, що між трубою і потоком рідких вуглеводнів під дією ультразвукового випромінювання можна домогтися утворення повітряного зазору, який виключить контакт рідини з трубопроводом, що, в свою чергу, призведе до збільшення при експлуатації трубопроводу і, як наслідок, знизити його аварійність.

На підставі наведених даних було вирішено розробити та побудувати ефективну модель, здатну створити поле кавітаційних хвиль достатньої потужності для утворення повітряного зазору між потоком рідких вуглеводнів та трубопроводом. З наступним моделюванням та розрахунком ефективності ефективної моделі.

Використовуючи дані проведення експериментів з ультразвукового впливу на реологічні властивості нафти, було вирішено використовувати п'єзокерамічні колонки як випромінювач ультразвуку.

П'єзоелектричний елемент - це електромеханічний перетворювач із п'єзоелектричних матеріалів певної форми та орієнтації щодо кристалографічних осей, за допомогою якого електрична енергія перетворюється на механічну.

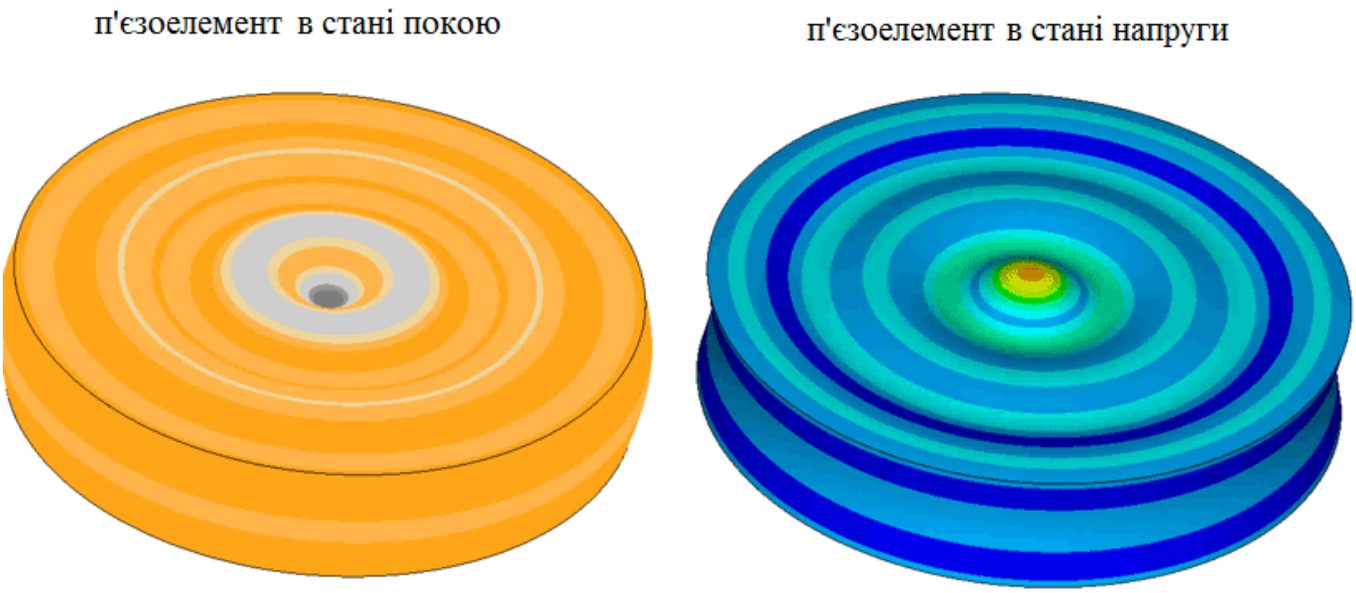


Рис.4. П'єзоелемент в стані покою та стані напруги

З малюнка видно, що в стані напруги п'єзоелемент змінює свою форму, на цьому ґрунтується принцип роботи п'єзоелементів. Під дією електрики п'єзоелементи здатні створювати гармонійні коливання за своєю площею.

З малюнка видно, що в стані напруги п'єзоелемент змінює свою форму, на цьому ґрунтується принцип роботи п'єзоелементів. Під дією електрики п'єзоелементи здатні створювати гармонійні коливання за своєю площею. При складанні ефективної моделі використовувалося 10 п'єзокерамічних колон. Крім п'єзокерамічних ультразвукових випромінювачів, у розроблену модель ефективної кавітації було включено ультразвуковий генератор, ним став ультразвуковий генератор УОС-1. коливання ультразвукової частоти.

Також застосовується ультразвукове видалення та запобігання асфальтосмолистим речовинам. Для руйнування таких відкладень на стінках трубок застосовується гідродинамічна обробка ультразвуком із доведеним високим ефектом. В роботі показано вплив ультразвуку на в'язкість та температуру застигання масел різного складу. У цій роботі було зроблено висновок, що ефективність обробки збільшується зі зменшенням вмісту парафінових компонентів у маслі та часі обробки. Посилання _0_ пояснює, що обробка олії ультразвуком при 25°C аналогічна ефекту зниження в'язкості при нагріванні до 40-50°C. Плинність цієї в'язкості збільшилася в 6 разів після однієї години обробки. Акустичний вплив зазвичай поєднують з додаванням розчинників, бензину, так як ультразвукова обробка не завжди ефективна, і поєднання цих методів дає найкращий результат.

Таким чином, для ефективного впливу ультразвукового випромінювання на транспортування рідких вуглеводнів по трубопроводу ефективна модель складається з підключеного до мережі ультразвукового генератора, що виступає як джерело живлення для п'єзокерамічних випромінювачів, які представлені в моделі десятьма п'єзокерамічними елементами. колонки, які підключені до генератора, які послідовно з'єднані і підключені до генератора за допомогою кабелю. Після збору ефективної моделі основне завдання – моделювання та розрахунок її практичної ефективності. [16]

РОЗДІЛ ІІІ. АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ ДАННИХ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВИПРОМІНЕННЯ НА ТРАНСПОРТУВАННЯ НАФТИ

За результатами дослідження того, який вплив має ультразвукове випромінення на транспорт нафти по нафтопроводу була розроблена та зібрана ефективна модель кавітації. З допомоги моделі можливо отримання

стійкого хвильового кавітаційного поля, у якому має досягнутися значна кавітація.

Пухирці отриманих кавітацій під час відшаровування виробляють потужні тиски імпульсу в рідкому вуглеводні, це впливає на його інтенсивність змішування. Тому змінюється фізичний вміст рідини – зменшується її в'язкість. Найбільше поле кавітаційної хвилі знаходиться біля стінок труби, це сприяє розподілу шару турбулентності, який є сповільнюючим компонентом розподілу ламінарного підшару того ж турбулентного шару.

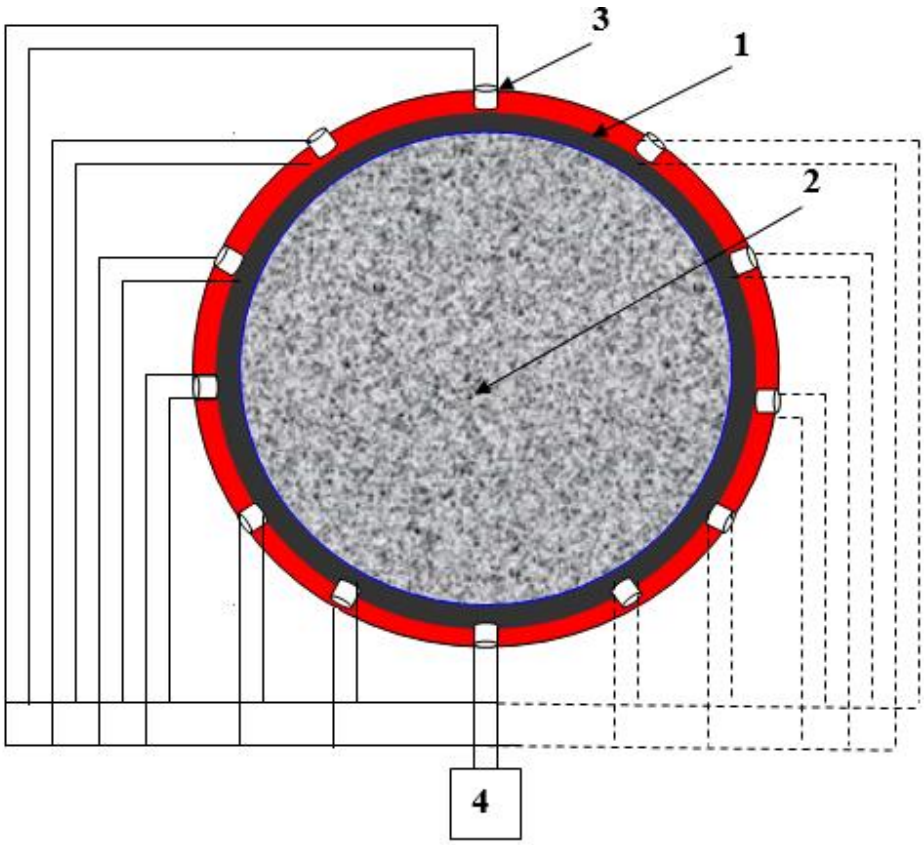
На насиченість впливає коефіцієнт зниження гідравлічного опору в трубі від його зменшеного значення, його можна отримати тільки за розмірністю абсолютної шорсткості трубопроводу. Ці ефекти сприяють збільшенню потіку рідких вуглеводнів транспортування.

Під час встановлення п'єзокерамічного ряду треба видалити шар фарби з місця труби де буде розташовано п'єзоелемент, щоб змінити кількість ультразвукового випромінення, яке споживатиметься самою трубою.

Після елементи послідовно з'єднують один з одним і вимикаються від живлення генератора, який вимикається від електричної мережі. Це вдосталь, аби модель була підготовлена до використання.

Після розташування деталей моделі кавітації, з'єднаних між собою та підключених до живлення генератора, необхідно лише встановити потрібні дані ультразвукового збудження явищ кавітації для потоку рідкого CO2, у панелі приладів генератора. Тому у кінцевому значенні впливу ультразвукового випромінення для транспорту нафти трубопроводом була розрахована та створена вдала модель кавітації, готова до досліджень. Результат дослідження також став моделлю розрахунку математичних методів ефективності даної моделі.

З допомоги мови математичного розрахунку «MATLAB», дозволяє провести математичний розрахунок у графічному виді, також був розрахований інтенсив акустичного поля, що було створено кавітацією. Розрахунок був виконаний за наступних параметрів: частота УЗ - 20000 Гц, макс. сумм. акустичної потужності пристрій - 1600 Вт, горизонтальній площині поперечного перерізу потіку масла, що транспортовано та відповідає граничній кавітації у маслі для тиску 4 МПа.



Умовні позначення

1 - зовнішня стінка трубопроводу
2 - вуглеводнева рідина, що транспортується
3 - ультразвуковий випромінювач
4 - ультразвуковий генератор

Рис. 5. Фундаментальні елементи моделі вдалої кавітації під час використання.

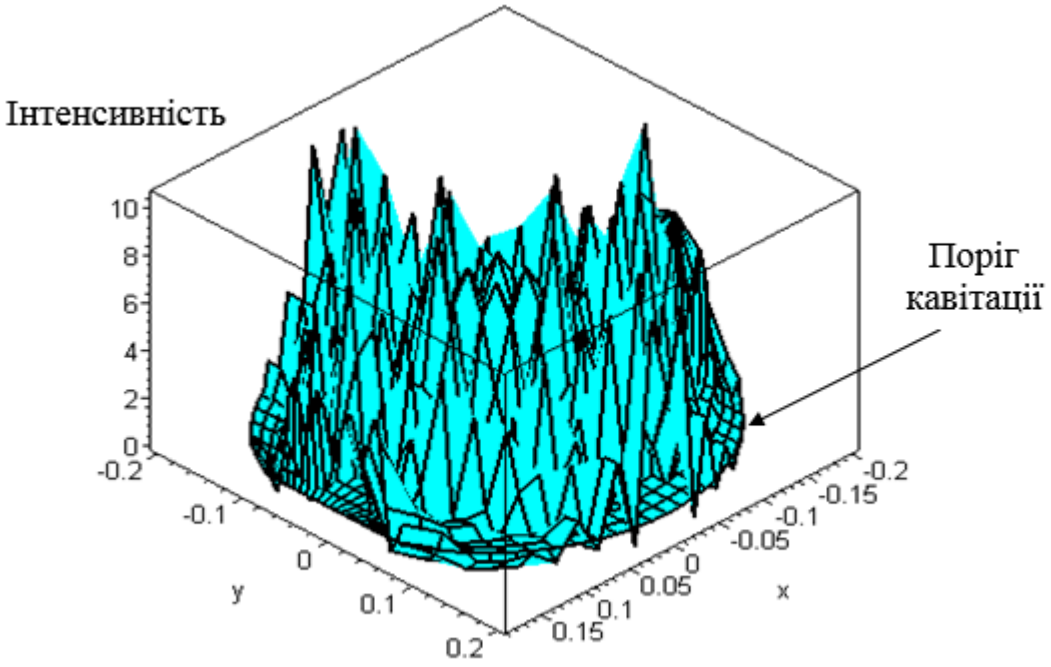


Рис.6. Розрахунки напруженості ультразвукового поля по проточному перерізу нафти, що рухається.

На малюнку видно, що за цих заданих умов робочої моделі потоку нафти, котра має транспорт, створено стійку польову кавітаційну хвилю, його пікова потужність не збирається безпосередньо при контакті масла та поверхні труби, це пов'язано з тим, що діаметр трубопроводу 0,2 м товщина стінки нафтопроводу відносно мала, через це він не затримує і майже не поглинає ультразвукове випромінювання із частотою 20000 Гц, але передає його. повністю у рідину.

Це призводить до значного розвитку кавітації, але не відриву прикордонного шару масла. Крім того, методом математичного аналізу з використанням розробленої ефективної моделі розраховано збільшення швидкості руху нафти у трубопроводі внаслідок виникнення кавітаційних явищ у потоці нафти.

Коли нафта тече у вигляді в'язкої несжимаемой рідини горизонтальним трубопроводом, існує залежність між падінням тиску (ΔP) на ділянці трубопроводу Δx ($\frac{\Delta P}{\Delta x}$) та середньою витратою рідини: ($\overline{V}$):

$$\frac{\lambda_c \rho_{ж} \overline{V^2}}{2d} = \frac{\Delta P}{\Delta x},$$

де $\overline{V}$ - середня швидкість течії,

ΔP – перепад тиску, Δx – відрізок трубопроводу,

$\rho_{ж}$ - густина рідини,

d – діаметр трубопроводу,

λ_c - безрозмірний коефіцієнт опору труби, що характеризує втрати тиску на тертя і залежний від безрозмірного параметра - числа Рейнольдса:

$$\mathrm{Re} = \frac{\overline{V} d \rho_{ж}}{\mu_{ж}}$$

де $\mu_{ж}$ - в'язкість нафти

Середня швидкість у формулах визначається як частка від розподілу об'ємної витрати нафти (Q) на площу внутрішнього перерізу трубопроводу:

$$\overline{V} = \frac{4Q}{\pi d^2},$$

де $\overline{V}$ - середня швидкість,

Q – об'ємна витрата нафти.

Таким чином, для витрати нафти Q = 30 000 барелів на добу та діаметра трубопроводу d = 16 дюймів = 0,406 м середня швидкість становить 0,42.

В однофазному потоці параметра Re повністю характеризує процес. При Re<2000-2300 $\frac{кг}{м\,с}$ перебіг рідини ламінарний. У цьому випадку існує параболічний розподіл швидкості у поперечному перерізі труби (потік Пуазейля):

$$V(r) = \frac{1}{4\mu_{ж}}\left(\frac{\Delta P}{\Delta x}\right)\left(\frac{d^2}{4} - r^2\right)$$

де r – радіальна змінна

Середня витрата рідини дорівнює:

$$Q = \int_0^{d/2} V(r)dr = \frac{d^2}{32\mu_{ж}}\left(\frac{\Delta P}{\Delta x}\right)$$

а середня швидкість течії:

$$\overline{V} = \frac{4Q}{\pi d^2} = \frac{1}{8\pi\mu_{ж}}\left(\frac{\Delta P}{\Delta x}\right) = \frac{V_{\max}}{2}$$

де $V_{\max}$ - максимальна швидкість рідини.

Знайдемо коефіцієнт опору при ламінарному плині рідини:

$$\lambda_c = \frac{64}{\mathrm{Re}}$$

Оцінюємо критичне значення середньої швидкості рідини , здійсненні зміни режиму течії (Re ≥ 2000 $\frac{кг}{м\,с}$):

$$\overline{V}_{кр} = \frac{2000\mu_{ж}}{d\rho_{ж}}$$

При розрахунку критичного значення середньої швидкості води для нафти можна прийняти: в'язкість нафти $\mu_{ж} = 10^{-3}$ кг/мс, густина води 800 кг/м3. Якщо d = 0,5 м, то = 0,005 м/с. Це дуже низьке значення, яке відповідає реальній швидкості транспортування нафти. Це значення нижче фактичної

швидкості нафти у трубопроводі ($\overline{V}$=0,42 м/с), тому для реального трубопроводу ми беремо Re>>2000$\frac{кг}{м\,с}$), а рух рідини є турбулентним.

При турбулентному перебігу в гладкостенні труби формула Блузіуса може використовуватися для визначення коефіцієнта опору:

$$\lambda_c = \frac{0{,}316}{\sqrt[4]{\mathrm{Re}}}$$

При $\mathrm{Re} > 10^5$ справедлива формула Нікурадзе:

$$\lambda_c = 0{,}0032 + 0{,}221\,\mathrm{Re}^{-0{,}237}$$

У всій турбулентній області де для гладких труб може бути реалізовано рівняння Прандтля-Кишень:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda_0}} = 2\lg\left(\frac{\mathrm{Re}\sqrt{\lambda_0}}{2{,}51}\right)$$

Шорсткість труб враховується величиною абсолютної еквівалентної шорсткості Δ . Значення λ_c залежить від співвідношення Δ/d. Існує межа числа Рейнольдса (Re), вище за який безрозмірний коефіцієнт опору труби (λ_c) не залежить від нього і визначається тільки ставленням Δ/d. Це значення Re визначається з рівняння:

$$\mathrm{Re}\sqrt{\lambda_c}\left(\frac{\Delta}{d}\right) = 200$$

тобто, як тільки за фіксованого значення добутку $\mathrm{Re}\sqrt{\lambda_c} > 200\left(\frac{d}{\Delta}\right)$, λ_c, воно залишається незмінним при подальшому збільшенні Re. До граничного значення Re формула Коулбрука може використовуватися для визначення:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda_c}} = -2\lg\left[\left(\frac{2{,}51}{\mathrm{Re}\sqrt{\lambda_c}}\right) + \frac{1}{3{,}71}\left(\frac{\Delta}{d}\right)\right]$$

У зоні за граничним значенням Re:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda_c}} = 2\lg\left(\frac{3{,}71d}{\Delta}\right)$$

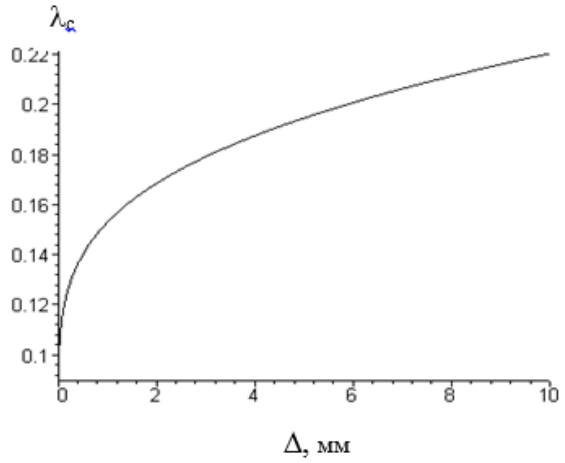


Рис.7. Графічне зображення залежність коефіцієнта опору труби від абсолютної шорсткості труби

Як видно з рисунка, що показує залежність коефіцієнта опору труби від абсолютної шорсткості труби, залежність описується напів-параболічною функцією, що показує, що коефіцієнт опору труби збільшується зі збільшенням абсолютної шорсткості труби. Розглянемо докладніше розподіл швидкостей рідини з поперечного перерізу труби в турбулентному потоці.

Турбулентні течії характеризуються тим, що поле істинних швидкостей рідких частинок має нерегулярно пульсуючий характер і нестійке. У турбулентному потоці макроскопічні частинки рідини інтенсивно перемішуються в поперечному напрямку, тим самим врівноважуючи середні швидкості[15].

У той же час прилипання рідини до стінок аеродинамічної труби (через в'язкість рідини та шорсткості стінок труби) $\frac{\partial V}{\partial r}$ призводить до появи у стінок різких градієнтів швидкості в поперечному напрямку, що викликає сильне збільшення сил поверхневого тертя і, як наслідок, опору труби (на одиницю площі):

$$\tau = \mu \frac{\partial V}{\partial r}$$

Коли в'язка рідина прилипає до стінки труби створюється турбулентний прикордонний шар. З вищевикладеного випливає, що будь-яка фізична дія, спрямована на зменшення або відрив прикордонного шару біля стінки, призводить до зниження коефіцієнта опору труби (який визначається тільки значенням шорсткості труби) і, як наслідок, збільшення потоку рідина по трубі.

Розрахуємо товщину розвиненого кавітаційного шару в трубі у припущенні, що кавітаційні пасма (ланцюжки скупчень кавітаційних бульбашок) утворюються безпосередньо біля емітера, тобто біля стін труби. У цьому випадку показник кавітації визначається відношенням між площею кільця з товщиною біля стінки та загальною площею поперечного перерізу труби:

$$k = \frac{\frac{\pi d^2}{4} - \pi\left(\frac{d}{2} - \delta\right)^2}{\frac{\pi d^2}{4}} = 0{,}15 \div 0{,}20$$

Бачімо що δ = 0,04 і d = 20 мм для d = 0,5 м. Це максимальне значення товщини шару розвиненою кавітації (за умови, що вся енергія ультразвуку поглинулась в об'ємі $\frac{\pi d^2 l}{4}$ за час $\Delta t = \frac{l}{V}$). Реально за цей час поглинається частина потужності УЗ-випромінювача:

$$\Delta W = W(1 - e^{-\beta \Delta t})$$

де β - коефіцієнт поглинання УЗ-хвилі в нафті.

Щоб оцінити час релаксації обурень, викликаних ультразвуком, в облучі, що опромінюється, розглянемо наступну модель. Припустимо, що відрив прикордонного шару та його інтенсивне перемішування під дією ультразвуку характеризується підвищенням ефективної «температури» цього шару на певну величину, що ми розуміємо як характеристику порушення динамічної рівноваги в рідині згідно з першим законом термодинаміки - робота, що здійснюється в прикордонному шарі, змінює його внутрішню енергію.

Нехай аналізований шар рідини, що має характерну товщину, рухається впритул до стінки трубки разом з рештою рідини. Це напівнескінченна довга трубка, обмежена діаметром. У процесі переміщення він охолоджується до кімнатної температури та поступово прилипає до стіни. Час охолодження буде часом охолодження. Процес охолодження цього шару описується наступним рівнянням теплопровідності:

$$\frac{\partial \Delta T}{\partial t} = D\left(\frac{\partial^2 \Delta T}{\partial r^2} + \frac{\partial \Delta T}{r \partial r} \right)$$

де D – коефіцієнт температуропровідності нафти; с граничними умовами:

$$\Delta T \Big|_{r=\frac{d}{2}} = 0, \Delta T \Big|_{r=\frac{d}{2}-\delta} = 0;$$

і початковою умовою: $\Delta T(r,0) = \Delta T_0$.

Рівняння (3.19) може бути вирішено методом розділення змінних. Загальне рішення має вигляд

$$\Delta T(r,t) = \Delta T_0 \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\lambda_n^2 Dt} F_n(r),$$

де $F_n(r)$ - радіальна частина рішення

Коефіцієнти, а також коефіцієнт D визначають час релаксації протягом якого температура знижується. Ці коефіцієнти є істинним позитивним корінням рівняння.

$$p_0(\lambda) = J_0\left(\frac{\lambda d}{2}\right)Y_0\left[\lambda\left(\frac{d}{2}-\delta\right)\right] - J_0\left[\lambda\left(\frac{d}{2}-\delta\right)\right]Y_0\left(\frac{\lambda d}{2}\right) = 0$$

де $J_0(x)$ і $Y_0(x)$ - функції Бесселя 1-го і 2-го порядку відповідно.

На рисунках 3.4, 3.5 и 3.6 показаны графики функции и графическое решение для расчета периода затухания эффекта кавитации под влиянием шероховатости поверхности трубы на поток масла для одного слоя развитой кавитации 10 и 5 мм.

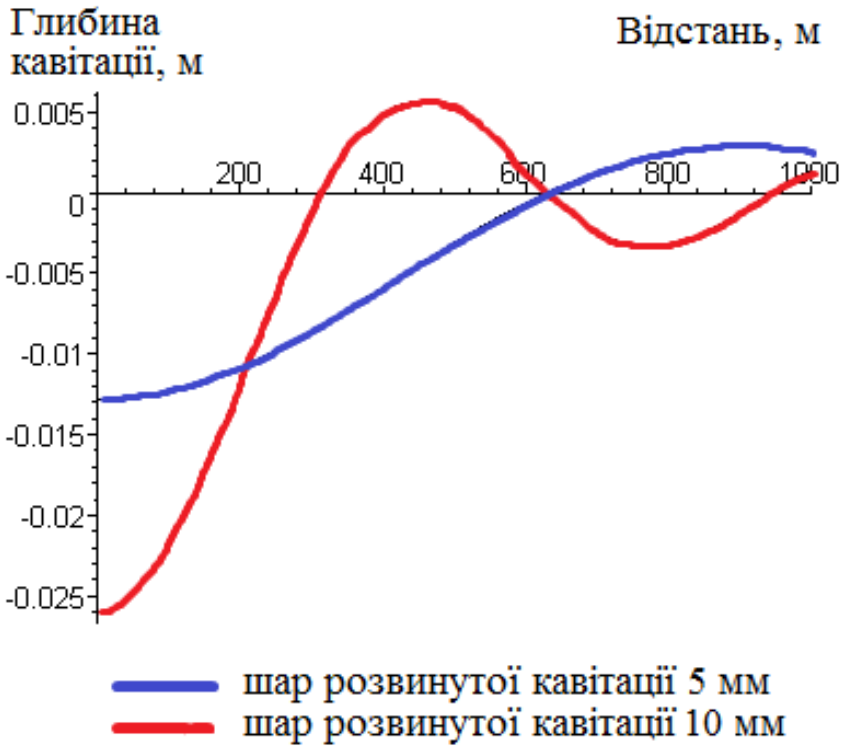


Рис.8.Графічне зображення залежності швидкості релаксації збуреної нафти від розміру шару розвинутої кавітації в 5 мм та 10 мм

Як видно з діаграми залежностей, при розігрітому шарі олії розміром 5 мм швидкість гасіння ефекту кавітації більша, ніж при шарі розвиненої кавітації 10 мм.

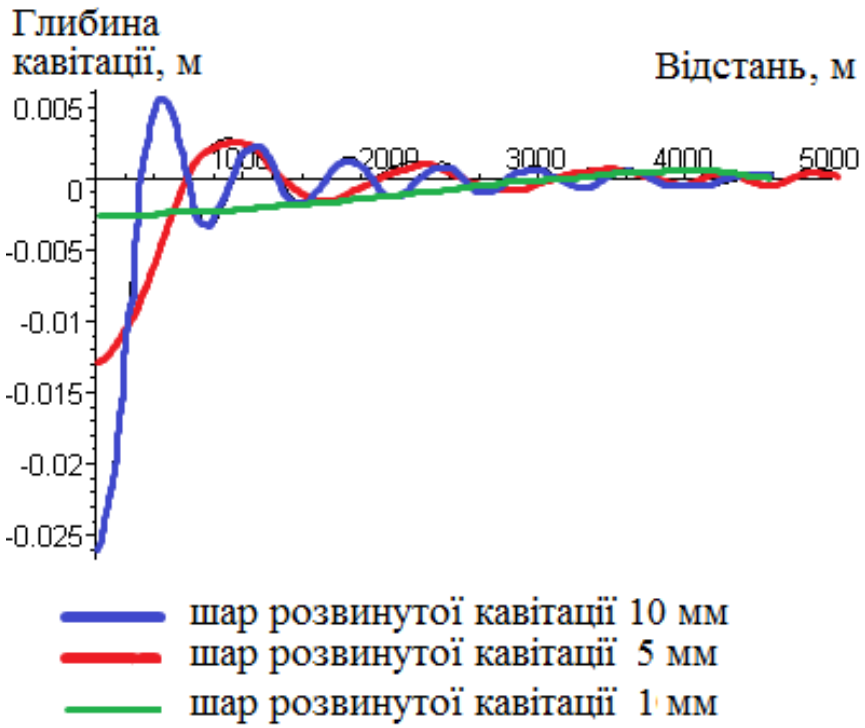


Рис.9.Графічне зображення залежності швидкості порушеної релаксації олії від розміру розвиненого кавітаційного шару 1 мм, 5 мм та 10 мм.

З малюнка видно, що тенденція зберігається і при розвиненому кавітаційному шарі 1 мм ослаблення ефекту спостерігається швидше, ніж у разі шару 5 мм, а при розвиненому кавітаційному шарі 10 мм ослаблення ефекту спостерігається повільніше, ніж у випадку шару 5 мм.

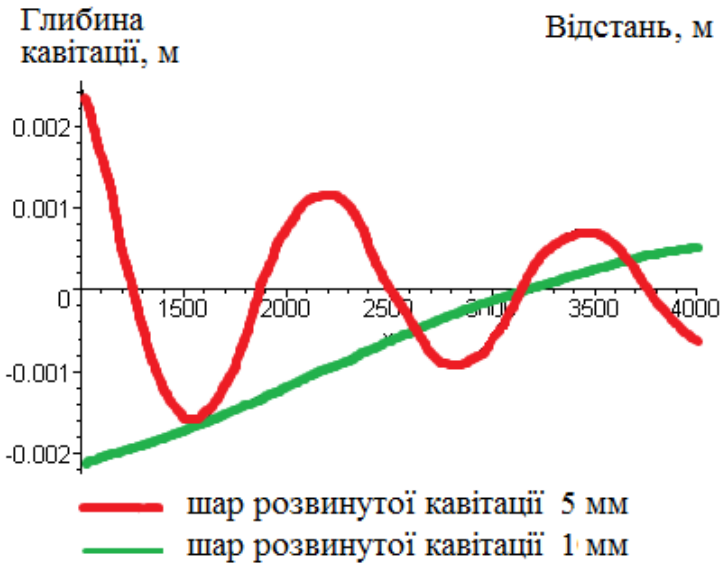


Рис.10.Графічне зображення залежності швидкості релаксації обуреної олії від розміру розвиненого кавітаційного шару 1 мм та 5 мм.

З малюнка видно, що, як і в попередніх випадках, чим більша товщина розвиненого кавітаційного шару, тим менша швидкість загасання ефекту. Це можна пояснити тим, що чим менший шар масла, тим слабший ефект перемішування турбулентності в ньому і, як наслідок, більш розвинені ефекти ламінарного потоку, який, у свою чергу, більшою мірою схильний до нерівностей поверхні. трубопровід[14].

Таким чином, можна зробити висновок, що чим більше шар потоку масла, в якому кавітація розвивається через ультразвукове опромінення, тим більший період спостереження ефектів кавітації і тим менша швидкість їх гасіння.

У таблиці 3.7 наведено результати графічних рішень для розрахунку періоду згасання кавітаційного ефекту під впливом шорсткості поверхні труби в потоці олії для розвиненого шару кавітації 1 мм, 5 мм, 10 мм і 20 мм. Таблиця 3.7 – Залежність часу релаксації обуреної олії від розміру розвиненого кавітаційного шару.

Товщина шару розвинутої кавітації ,мм	Час релаксації збуреної нафти, с
20	392
10	98
5	24
1	1

Згідно з даними таблиці, найбільший час спостереження за спадом ефекту кавітації відповідає найбільшому показнику товщини розвиненого кавітаційного шару. Тобто, у разі стимулювання розвитку стійкого кавітаційного поля товщиною 20 мм, повне згасання ефекту спостерігатиметься за 392 секунди. За цей час нафта встигне пройти певну відстань трубопроводом, поки її в'язкість і швидкість не повернуться у вихідний стан.

Тобто ця відстань проходитиме потоком масла швидше, ніж у некавітаційному стані. У цьому випадку, якщо в завоюванні, яке за 392 секунди перевищує потік олії з розвиненим на ньому шаром кавітації, рівним 20 мм, встановити ще одну ефективну модель, то можна досягти невгасання ефекту кавітації вдвічі більше, ніж на ділянці трубопроводу. Крім того, видно графіки залежності швидкості релаксації обуреної олії від розміру розвиненого кавітаційного шару:

1) у розглянутому інтервалі товщин δ значення коренів $\lambda_n >> 1$;

2) залежність $p_0(\lambda)$ характеризується періодичністю. Це можна пояснити наступним чином.

Скористаємося асимптотичними уявленнями для $J_0(x)$ і $Y_0(x)$:

$$J_0(x) = \sqrt{\frac{2}{\pi x}}\cos\left(x - \frac{\pi}{4}\right), Y_0(x) = \sqrt{\frac{2}{\pi x}}\sin\left(x - \frac{\pi}{4}\right)$$

Підставивши ці вирази в (3.21), отримаємо:

$$\frac{4}{\pi\lambda\sqrt{d(d-\delta)}}\sin(\lambda\delta) = 0.$$

Рішенням цього рівняння буде:

$$\lambda_n\delta = \pi n, \quad \text{де } n = 1, 2, 3\ldots$$

Звідси випливає:

$$\lambda_n = \frac{\pi n}{\delta} \qquad (n = 1, 2, 3\ldots)$$

Слід зазначити, що низка досить швидко сходиться. Отже, оцінки значення часу релаксації можна використовувати лише перший член. Отримаємо наступне вираження для залежності часу релаксації від товщини шару:

$$\tau_{рел} = \frac{\delta^2}{\pi^2 D}$$

Коефіцієнт температуропровідності для нафти становить величину $D = 10^{-7}$ м2/с. Тому для часу релаксації отримаємо наступну формулу:

$$\tau_{рел}(c) \approx \delta^2(мм) \qquad \left(\frac{\pi^2}{\delta^2} >> 10^{-3}\right).$$

Ця формула з точністю до 2% збігається з результатами чисельних розрахунків, наведеними в таблиці 3.7.

Зверніть увагу, що з точки зору властивостей, що інгібують, ефект прикордонного шару аналогічний ефекту шорсткості труби. Таким чином,

можна сказати, що видаливши весь прикордонний шар, можна буде домогтися зменшення коефіцієнта опору труби всього вдвічі. При цьому швидкість транспортування нафти може значно збільшитись. Остаточна оцінка може бути зроблена після отримання параметрів трубопроводу: тиск, довжина, швидкість, витрата олії.

Також слід зазначити, що можливості практичного застосування ультразвукової техніки можуть бути ефективнішими порівняно з теоретичними оцінками. У зв'язку з цим виникає необхідність проведення експериментальних досліджень, що полягають у випробуванні моделі діючого трубопроводу.

Таким чином, при дослідженні впливу ультразвукового випромінювання на транспортні властивості нафти в трубопроводі були визначені критерії на потік нафти, які повинні відповідати дії ультразвукового пристрою, щоб ефективно впливати на характер нафти. потік рідких вуглеводнів у трубопровід зниження аварійності трубопроводу. Відповідно до вимог була розроблена та зібрана ефективна модель. Також було розраховано ефективність розробленої моделі. В результаті розрахунків було визначено, що запропонована ефективна модель здатна збільшити швидкість руху рідких вуглеводнів трубопроводом у 1,4 рази. Крім того, була встановлена можливість утворення повітряного зазору між потоком масла і трубопроводом завдяки здатності моделі кавітації створювати стійке хвильове поле кавітації в потоці нафти.

РОЗДІЛ IV ШЛЯХИ ЗМЕНШЕННЯ РИЗИКІВ ДЛЯ ЕКОЛОГІЇ ПРИ ТРУБОПРОВІДНОМУ ТРАНСПОРТУВАННІ ВУГЛЕВОДНІВ

На підставі проведених досліджень впливу ультразвукових методів на властивості припливу нафти в нафтопровід, можна сказати, що ультразвукові методи впливу мають значну ефективність у зниженні аварійності нафтопроводів. Це пов'язано з тим, що в результаті ультразвукової обробки нафтового потоку в ньому створюється стійке кавітаційно-хвильове поле, особливістю якого є здатність стимулювати перемішування шарів нафтового потоку, які в поворот призводить до зниження в'язкості олії та збільшення швидкості його проходження через олію. трубопровід, а також стимулює утворення повітряного зазору між потоком нафти та стінками трубопроводу. Завдяки наявності цього повітряного зазору можна позбавитися такого явища, як прямий контакт масла з трубопроводом.

Це, у свою чергу, дозволяє знизити ризик збільшення аварійності нафтопроводу через корозію металу стінок трубопроводу, яка зазвичай виникає в результаті контакту металевих стінок трубопроводу з рідкими вуглеводнями, такими як масло[13].

Результатом дослідження методів впливу ультразвуку на властивості потоку рідких вуглеводнів стала розробка ефективної моделі кавітації, здатної задовольнити вимоги щодо впливу на транспортні властивості нафти з метою зниження екологічних ризиків при експлуатації нафти. трубопровідний спосіб транспортування вуглеводнів. Оскільки основними причинами виникнення екологічних ризиків при трубопровідному транспортуванні вуглеводнів є зношування труб в результаті тривалого контакту металу з обводненою вуглеводневою рідиною, а також використання технологій збільшення пропускної спроможності нафтопроводів, що полягає в нагріванні мазуту. транспортується трубопроводом, що, своєю чергою, разом із коефіцієнтом зносу. труб створює небезпеку розриву нафтопроводу у вигляді вибуху через безпосередню близькість нагрівальних елементів до горючої вуглеводневої рідини.

Дуже перспективним напрямком є використання методу, що виключає контакт нафти з нафтопроводом, тобто збільшення розвитку корозії металів, внаслідок чого знижується подальше зношування труб трубопроводів. на розвиток озеленення нафтотранспортної мережі у зв'язку із підвищенням екологічної безпеки трубопровідного транспорту вуглеводнів. Моделювання фактичного використання розробленої моделі кавітації показало, що запропонована модель здатна вирішувати такі завдання:

- знизити екологічні ризики транспортування вуглеводнів трубопроводами, стимулюючи стійке поле кавітаційних хвиль та утворення проміжного шару між трубопроводом та нафтою;

- дозволяє реалізувати метод за рахунок встановлення ультразвукових випромінювачів на зовнішній стіні існуючої труби на її ділянці без додаткових інженерних споруд;

- реалізувати метод з низькою вартістю, низьким енергоспоживанням пристрою (2-4 Вт) та швидким міжремонтним періодом (кілька тижнів для конвеєра)

- Збільшити пропускну здатність трубопроводів в експлуатації.

Розрахунки ефективності розробленої моделі виявили можливість збільшення швидкості руху олії у 1,4 рази. Остаточна оцінка може бути виконана після отримання параметрів конкретного трубопроводу. Можливості практичного застосування ультразвукової технології можуть бути ефективнішими, ніж теоретичні оцінки, через різні характеристики транспортних властивостей різних масел. Підвищуючи ефективність використання запропонованої моделі, можна виявити використання таких пристроїв на лінійних ділянках нафтопроводів. Таким чином, ультразвукові технології стануть основним методом зниження екологічних ризиків під час транспортування вуглеводнів[12].

ВИСНОВКИ

1. Протягом останніх трьох років обсяги нафти, що проходить транзитом українськими нафтопроводами в інші країни, щорічно збільшувалися. Термін служби більшості трубопроводів розрахований на 2000-ті роки, тому ремонтні роботи із заміни ділянок трубопроводу проводяться щорічно. Проте, враховуючи необхідність безперебійного транзиту нафти і той факт, що українська нафтопровідна система становить приблизно 4000 кілометрів, значна частина нафтопроводів, що підлягають заміні, все ще перебуває в експлуатації.

2. У майбутньому прогнозується зростання транзиту нафти через територію України, що, своєю чергою, ставить під сумнів методи збільшення пропускної спроможності нафтопроводів, які використовуються сьогодні в Україні. Основними недоліками цих методів є або нераціональне використання енергоресурсів, або збільшення аварійності нафтопроводів. Нераціональне використання енергоресурсів полягає у використанні технологій нагрівання олії для покращення транспортних властивостей та високих енерговитрат для забезпечення нагрівання олії. Збільшення аварійності нафтопроводів пов'язане з тим, що мазутні методи призводять до збільшення розвитку корозії металу труб нафтопроводу, що у свою чергу у поєднанні зі станом нафтопроводу. нафтопровід, призводить до збільшення екологічних ризиків при транспортуванні вуглеводнів трубопроводами.

3. Серед екологічних ризиків, пов'язаних з транспортуванням вуглеводнів трубопроводами, найбільш небезпечними є ризик для життя та здоров'я людей, які мешкають у безпосередній близькості від трубопроводів. Хоча санітарно-захисна зона нафтопроводів становить 100 метрів, через особливості забудови деяких територій, у деяких регіонах санітарно-захисна зона не перевищує 50 метрів. Отже, ми повинні говорити про ризик вибуху

трубопроводу та прориву, за яким слідує епідемія розливу нафти, що, в свою чергу, може призвести до екологічних наслідків, таких як загроза життю та здоров'ю людини., Пошкодження та руйнування житла, пошкодження та руйнування компоненти середовища, забруднення компонентів довкілля. Аварії на українських нафтопроводах – приклад негативних наслідків збільшених екологічних ризиків транспортування вуглеводнів трубопроводами. Це, у свою чергу, висвітлило незначний розвиток технологій збирання розлитої нафти, що призвело до їхньої високої вартості.

4. Всі ці фактори в сукупності вказують на необхідність розробки методів зниження екологічних ризиків, пов'язаних із способами транспортування нафтопроводами. Передбачається, що це є методи ультразвукового впливу. Використовуючи ультразвукові методи для впливу на реологічні властивості олії, можна зменшити його в'язкість та підвищити температуру застигання без нагрівання олії. Саме ці показники впливають на швидкість перебігу олій трубопроводом. Крім того, особливістю ультразвукових методів є можливість кавітації в потоках сирої нафти - явища, що сприяє продовженню терміну служби трубопроводів сирої нафти і, як наслідок, зниження небезпеки для навколишнього середовища при транспортуванні сирої нафти трубопроводами. Хочу відзначити, що зниження аварійності трубопроводів пов'язане з тим, що особливістю кавітації є здатність створювати повітряний зазор з кавітаційних бульбашок між потоком вуглеводневої рідини в трубопроводі і трубопроводом. Це, у свою чергу, унеможливлює прямий контакт рідини з металом і збільшує термін служби трубопроводу.

5. Результатом дослідження методів впливу ультразвуку на властивості потоку рідких вуглеводнів стала розробка ефективної моделі кавітації, здатної задовольнити вимоги впливу на транспортні властивості рідини. екологічні ризики трубопровідного транспорту вуглеводнів

6. Моделювання ефективного використання розробленої моделі кавітації показало, що запропонована модель здатна вирішувати такі завдання:

- зниження екологічних ризиків трубопровідного транспорту вуглеводнів за рахунок стимулювання стійкого поля кавітаційних хвиль та утворення проміжного шару між трубопроводом та нафтою;

- дозволяє реалізувати метод за допомогою ультразвукових перетворювачів, встановлених на зовнішній стіні існуючого трубопроводу на його ділянці, без додаткових інженерних споруд;

- реалізувати дешевий метод, низьке енергоспоживання пристрою (2-4 Вт) та швидку окупність (кілька тижнів для нафтопроводу)

- збільшити витрати трубопроводів у робочому стані.

7. Зростання ефективності розгорнутої моделі показало потенціал підвищення ліквідності нафти в 1,4 рази. Залишкові оцінки можуть бути визначені шляхом налаштування параметрів у конкретному конвеєрі. Практичні можливості зберігання ультразвукової технології можуть бути ефективнішими з погляду теоретичних оцінок для розробки нових функцій транспортної влади нової нафти.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Wang Z., Gu S. State-of-the-art on the development of ultrasonic equipment and key problems of ultrasonic oil production technique for EOR in China. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, vol. 82, iss. 3, pp. 2401–2407. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.089.

2. Arabzadeh H., Amani M. Application of a novel ultrasonic technology to improve oil recovery with an environmental viewpoint. Journal of Petroleum &

Environmental Biotechnology, 2017, vol. 8, iss. 2, pp. 323. http://doi.org/10.4172/2157-7463.1000323.

3. Abramova A., Abramov V., Bayazitov V., et al. Ultrasonic technology for enhanced oil. Engineering, 2014, vol. 6, iss. 4, pp. 177–184. http://doi.org/10.4236/eng.2014.64021

4. Ghamartale A., Escrochi M., Riazi M., et al. Experimental investigation of ultrasonic treatment effectiveness on pore structure. Ultrasonics Sonochemistry, 2019, vol. 51, pp. 305–314. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.10.002.

5. Dehshibi R. R., Mohebbi A., Riazi M. Experimental investigation on the effect of ultrasonic waves on reducing asphaltene deposition and improving oil recovery under temperature control. Ultrasonics Sonochemistry, 2018, vol. 45, pp. 204–212. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.03.023.

6. Livinus A., Yeung H., Lao L. Y. Restart time correlation for core annular flow in pipeline lubrication of high-viscous oil. Journal of Petroleum Exploration and Production Technology, 2017, vol.

7, iss. 1, pp. 293–302. https://doi.org/10.1007/s13202-016-0241-y. 7. Qiang H., Donghan T., Laicheng C., et al. Ultrasonic irradiation reduces Shengli heavy oil viscosity. Oil & Gas Journal, 2017, vol. 115, pp. 46–49.

8. Ануфриев Р. В., Волкова Г. И. Влияние ультразвука на структурно-механические свойства нефтей и процесс осадкообразования / / Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327. – № 10. – С. 50–58.

9. Abramov V. O., Mullakaev M. S., Abramova A. V., et al. Ultrasonic technology for enhanced oil recovery from failing oil wells and the equipment for its implementation. Ultrasonics Sonochemistry, 2013, vol. 20, pp. 1289–1295. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2013.03.004.

10. Li. J., Qi D., Wang Z. Research on ultrasonic paraffin deposition inhibition for crude oil extraction and transportation. Petroleum Science and Technology, 2019, vol. 37, pp. 61–67. https://doi.org/10.1080/10916466.2018.1493500.

11. Ануфриев А. С. Повышение эффективности магнитоэлектрических генераторов малой мощности для ветроэнергетических установок: дис. … канд. техн. наук: 05.09.01 / Самарский государственный технический университет, 2018.

12. Malkin A. Y., Khadzhiev S. N. On the rheology of oil (Review). Petroleum Chemistry, 2016, vol. 56, pp. 541–551. https://doi.org/10.1134/s0965544116070100.

13. Chanda D., Sarmah A., Borthakur A., et al. Combined effect of asphaltenes and flow improvers on the rheological behavior of Indian waxy crude oil. Fuel, 2008, vol. 77, iss. 11, pp. 1163–1167. https://doi.org/10.1016/S0016-2361(98)00029-5.

14. Никитин М. Н., Гладков П. Д., Колонских А. В. и др. Изучение реологических свойств тяжелой высоковязкой нефти Ярегского месторождения / / Записки Горного института. – 2012. – Т. 195. – С. 73–77.

15. Sun G., Zhang J., Ma Ch., Wang X. Start-up flow behavior of pipelines transporting waxy crude oil emulsion. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2016, vol. 147, pp. 746–755. https://doi.org/10.1016/j.petrol.2016.10.007.

16. Gaona Sierra A., Ribeiro Varges P., Santiago Ribeiro S. Startup flow of elasto-viscoplastic thixotropic materials in pipes. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2016, vol. 147, pp. 427–434. https://doi.org/10.1016/j.petrol.2016.09.003.

17. Larson R. G., Wei Y. A Review of thixotropy and its rheological modeling. Journal of Rheology, 2019, vol. 63, iss. 3, pp. 477. https://doi.org/10.1122/1.5055031.

18. Li H., Wang X., Ma C., et al. Effect of electrical treatment on structural behaviors of gelled waxy crude oil. Fuel, 2019, vol. 253, pp. 647–661. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.05.001.