

Міністерство освіти і науки України
Івано-Франківський національний технічний університет
нафти і газу

АЛЬ-ДАНДАЛ РАЕД САЛЕХОВИЧ

УДК 622.692.6

**РАЦІОНАЛЬНІ РЕЖИМИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ МАГІСТРАЛЬНИХ
НАФТОПРОДУКТОПРОВОДІВ З ВИКОРИСТАННЯМ
ПРОТИТУРБУЛЕНТНИХ ПРИСАДОК**

05.15.13 – Трубопровідний транспорт, нафтогазосховища

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

м Івано-Франківськ – 2016

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор

Грудз Володимир Ярославович

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, завідувач кафедри спорудження та ремонту газонафтопроводів і газонафтосховищ

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор **Бойченко Сергій Валерійович**, Національний авіаційний університет, завідувач кафедри екології (м. Київ).

кандидат технічних наук **Яновський Сергій Романович**, ПАТ «Укртранснафта», філія «Магістральні нафтопроводи «Дружба», головний інженер (м. Львів)

Захист відбудеться 28 лютого 2016 р. о 13 год. 00 хв. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 20.052.04 в Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу за адресою: 76019, Україна, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15.

З дисертацією можна ознайомитись в науково-технічній бібліотеці Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу за адресою: 76019, Україна, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15.

Автореферат розісланий 21 грудня 2016 р.

Учений секретар спеціалізованої вченої ради Д 20.052.04, кандидат технічних наук, доцент



Пилипів Л.Д.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність проблеми. Роль трубопровідного транспорту в нафтогазовій галузі України є надзвичайно високою і її складно переоцінити. Як відомо, на сьогоднішній день в Україні функціонує понад 40 тис. кілометрів магістральних трубопроводів і трубопроводів-відгалужень, призначених для транспортування нафти та газу й інших продуктів.

У процесі експлуатації магістральних нафтопродуктопроводів важливе значення має раціональне використання електроенергії, вартість якої складає основну статтю витрат на трубопровідне транспортування нафти. Практичне вирішення цього питання пов'язане з розробленням науково обґрунтованих норм витрат електроенергії на перекачування нафти для кожного нафтопродуктопроводу чи окремої експлуатаційної ділянки. Однак, не варто нехтувати спеціальними методами перекачування нафти та нафтопродуктів, спрямованими на зменшення енерговитрат на транспортування, до яких слід віднести використання протитурбулентних присадок.

Протитурбулентні присадки (ПТП) – високомолекулярні полімерні речовини, що дозволяють зменшити коефіцієнт гідравлічного опору трубопроводів під час перекачування при турбулентному режимі нафт і нафтопродуктів. Уперше про можливість застосування високомолекулярних полімерів для зниження гідравлічного опору течії рідин в трубопроводах згадував Б.А.Томс.

Особливістю протитурбулентних присадок, яка визначає їх здатність знижувати гідравлічний опір нафтопродуктопроводу, є високі вимоги до ступеню чистоти продукту. В зв'язку з цим ринкова вартість імпортованих ПТП надто висока; при цьому їх дефіцит вимагає пошуку нових дешевих замінників.

Широкий вибір різних типів і марок протитурбулентних присадок на світовому ринку ставить задачу щодо проведення порівняльного аналізу ефективності їх застосування при транспортуванні різних нафт і нафтопродуктів. При цьому йдеться про порівняння не лише ступеня зниження гідравлічного опору при транспортуванні, а й техніко-економічних показників.

Застосування протитурбулентних присадок при перекачуванні нафт і нафтопродуктів вимагає особливого підходу до регулювання режимів роботи перекачувальних станцій з метою економії енерговитрат на транспортування. Тому проблема застосування ПТП у трубопровідному транспорті на даний час є особливо актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота носить науково-прикладний характер і входить у комплекс тематичних планів НАК «Нафтогаз України», спрямованих на зменшення енерговитратності при експлуатації нафтотранспортного комплексу і окреслених Національною програмою «Нафта і газ України до 2030 року».

Мета і завдання дослідження. Метою проведення досліджень є прогнозування раціональних режимів експлуатації магістральних нафтопродуктопроводів з використанням і вибором протитурбулентних присадок на основі техніко-економічного порівняння їх властивостей.

Для реалізації поставленої мети дослідження вибрано та реалізовано наступні задачі досліджень:

1. Дослідження впливу протитурбулентних присадок на гідравлічний опір нафтопродуктопроводу.
2. Порівняльний аналіз застосування в трубопровідному транспорті нафтопродуктів протитурбулентних присадок різних типів
3. Нестационарні процеси в нафтопродуктопроводі при використанні протитурбулентних присадок
4. Використання протитурбулентних присадок для зменшення енерговитрат на перекачування нафти та прогнозування режимів роботи перекачувальних станцій нафтопродуктопроводу при їх застосуванні
5. Техніко-економічний аналіз використання протитурбулентних присадок у трубопровідному транспорті нафтопродуктів

Об'єктом дослідження є ефективність застосування протитурбулентних присадок для зниження коефіцієнта гідравлічного опору нафтопродуктопроводу.

Предметом дослідження є встановлення характеристик сумішей нафтопродуктів із протитурбулентними присадками в процесі їх транспортування з метою зниження енерговитрат на перекачування.

Методи дослідження: системний аналіз експлуатаційних параметрів нафтопродуктопроводів, експериментальні методи аналізу показників властивостей нафтопродуктів, методи побудови математичних моделей та їх реалізації, кореляційно-регресійний аналіз, факторний аналіз, методи програмування, виявлення впливу організаційно-технічних чинників на ефективність експлуатації.

Положення, що захищаються. Закономірності впливу протитурбулентних присадок на гідравлічний опір нафтопродуктопроводів і протікання нестационарних процесів при трубопровідному транспортуванні нафтопродуктів з метою зменшення енерговитрат.

Наукова новизна отриманих результатів.

Вперше

- на основі експериментальних досліджень встановлено закономірності зниження гідравлічного опору при транспортуванні дизельного пального та гасу в суміші з протитурбулентними присадками поліакриламід (ПАА) і карбоксиметилцелюлоза (КМЦ);
- встановлено оптимальні концентрації протитурбулентних присадок ПАА і КМЦ з точки зору мінімізації гідравлічного опору при транспортуванні дизельного пального та гасу;
- запропоновано методи порівняння ефективності різних типів протитурбулентних присадок із урахуванням їх цінової вартості;
- на основі аналітичних досліджень процесу руху нафтопродукту та його суміші з ПТП проведено аналіз нестационарних режимів роботи нафтопродуктопроводу;
- проведено дослідження режимів роботи перекачувальних станцій у процесі заміщення чистого нафтопродукту його сумішшю з ПТП;
- запропоновано методи оптимізації режимів роботи нафтопродуктопроводів із застосуванням ПТП в умовах ринкових відносин.

Практичне значення отриманих результатів. Встановлені закономірності зменшення гідравлічного опору нафтопродуктопроводу при застосуванні ПТП, а також розроблені рекомендації з прогнозування й оптимізації режимів роботи оформлені в вигляді комплексної галузевої методики та передані до впровадження на нафтопродуктопроводах «ПрикарпатЗахідТранс».

Особистий внесок здобувача. Проведено дослідження впливу протитурбулентних присадок ПАА і КМЦ на гідравлічний опір трубопроводу; в результаті встановлено оптимальні концентрації ПТП з точки зору мінімізації енерговитрат на транспортування нафтопродуктів[1,2].

Встановлено характер руху границі при витисненні з трубопроводу нафтопродукту його сумішшю з ПТП, а також виконано прогнозування нестационарного режиму роботи нафтопродуктопроводу [3,4,5].

Проведено порівняльний аналіз використання різних типів ПТП для зниження гідравлічного опору нафтопродуктопроводу й економії енерговитрат на транспортування [4,6].

Удосконалено принцип і методику оптимізації режимів роботи нафтопродуктопроводу та перекачувальних станцій при використанні протитурбулентних присадок для умов ринкових відносин[5].

Апробація результатів дисертації. Результати досліджень доповідались на Міжнародній науково-технічній конференції «Машини, обладнання і матеріали для нарощування вітчизняного видобутку та диверсифікації постачання нафти і газу» (Івано-Франківськ, 16-20 травня 2016 року). В повному обсязі результати дисертаційних досліджень доповідалися на науковому семінарі кафедри спорудження і ремонту газонафтопроводів та газонафтосховищ ІФНТУНГ і розширеному між кафедральному семінарі інституту нафтогазової інженерії ІФНТУНГ.

Публікації. За темою дисертації опубліковано 8 друкованих праць, 6 з них – у фахових виданнях, три з яких у закордонних виданнях, одна праця – одноосібна.

Структура дисертації. Дисертація складається зі вступу, 4-х розділів, висновків і додатків, які викладені на 106 стор. машинописного тексту та містять 8 табл., 18 рис. Список використаних літературних джерел містить 103 найменування.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** дано загальну характеристику роботи, показано актуальність теми, її зв'язок із науковими програмами, планами, вказано мету та задачі досліджень, їх наукову новизну, особистий внесок здобувача та структуру дисертації.

В першому розділі проведено аналіз проблеми зниження енерговитрат на транспортування нафти на основі літературних джерел, дано коротку характеристику нафтотранспортної системи України, виокремлено питання зниження гідравлічного опору нафтопродуктопроводів шляхом застосування протитурбулентних присадок (ПТП) і конкретизовано задачі досліджень.

На основі аналізу статистичних даних із транспортування нафти і нафтопродуктів показано, що завантаженість нафто- і нафтопродуктопроводів України по роках спадає. За таких умов критерій мінімізації енергозатрат на транспортування слід вважати пріоритетним. Одним із ефективних шляхів

зменшення витрат енергії на трубопровідний транспорт нафти і нафтопродуктів є застосування протитурбулентних присадок.

Протитурбулентні присадки – високомолекулярні полімерні речовини, що дозволяють зменшити коефіцієнт гідравлічного опору трубопроводів під час перекачування при турбулентному режимі нафт і нафтопродуктів.

На сьогодні для пояснення сутності ефекту Томса запропоновано близько 30 гіпотез. Залежно від прийнятого підходу їх можна умовно розділити на три класи: адсорбційні, структурні і такі, що базуються на реології в'язкопружних середовищ.

Маючи в своєму розпорядженні численні дані про зниження гідравлічного опору в трубах при турбулентному режимі за допомогою полімерних добавок, вчені направили свої зусилля на те, щоб пояснити механізм досягнутого ефекту і на цій основі запропонувати розрахункові методи обчислення коефіцієнта гідравлічного опору $\lambda_{П}$ в порівнянні з коефіцієнтом гідравлічного опору без застосування ПТП λ_0 . Для оцінки ефективності ПТП в плані зниження гідравлічного опору нафтопроводу пропонується використати співвідношення

$$\varphi = 1 - \frac{\lambda_n}{\lambda_0}.$$

Одна з нових методик для розрахунку коефіцієнта гідравлічного опору при перебігу вуглеводневої рідини полягає в тому, що ефективність ПТП можна представити двома залежностями: залежністю його відносної ефективності ψ / ψ_{\max} від величини дотичного напруження на стінці τ_w і залежністю максимальної ефективності ψ_{\max} від концентрації полімеру.

Значний практичний внесок у промислове впровадження технології перекачування нафтопродуктів із протитурбулентними присадками внесли вчені Російського державного університету нафти і газу ім. І. М. Губкіна. В ході цих робіт були запропоновані формули для розрахунку коефіцієнта гідравлічного опору потоків з малими добавками полімерів.

При перекачуванні нафт або нафтопродуктів із різною густиною і вязкостями з введенням ПТП на лімітних ділянках магістрального тру-проводу великої протяжності з проміжними перекачувальними станціями виникає необхідність регулювання режимів роботи. Це зумовлюється тим, що пропускна здатність магістрального трубопроводу обмежується пропускною здатністю лімітуючої ділянки і максимальним тиском. При цьому в міру заповнення ділянки присадкою його пропускна здатність буде змінюватися, і це зміна може коливатися в значних межах унаслідок зміни властивостей застосовуваної присадки, точності її введення і інших чинників.

Аналіз літературних джерел із питань транспортування нафти і нафтопродуктів магістральними нафтопродуктопроводами показує перспективність застосування протитурбулентних присадок з метою зменшення гідравлічного опору лінійної частини нафтопродуктопроводу, завдяки чому досягається економія енергоресурсів на трубопровідний транспорт. Однак, різні протитурбулентні присадки в композиції з різними нафтопродуктами показують

різну ефективність, що вимагає проведення додаткових досліджень в аспекті порівняльного характеру. Крім того, рух розчину проти турбулентної присадки в нафтопродукті ділянкою нафтопродуктопроводу викликає нестационарний процес заміщення чистого нафтопродукту його розчином із ПТП. Цей фактор також необхідно враховувати при прогнозуванні режимів роботи магістрального нафтопродуктопроводу

Другий розділ присвячено експериментальним дослідженням властивостей протитурбулентних присадок і встановленню їх оптимальних концентрацій у сумішах із дизельним паливом і гасом.

Результати досліджень протитурбулентних присадок імпортного виробництва, які в міру високого ступеня чистоти продукту мають високу цінову вартість, що впливає на собівартість транспортування нафтопродуктів. В роботах вітчизняних дослідників вказується на властивості зменшення гідравлічного опору при русі нафти і нафтопродуктів добавок технічних полімерів поліакриламід (ПАА) та карбоксиметилцелюлози (КМЦ), які випускаються в Україні з набагато нижчою ціною. Однак, результати досліджень ефективності зниження гідравлічного опору при їх застосуванні в літературі відсутні.

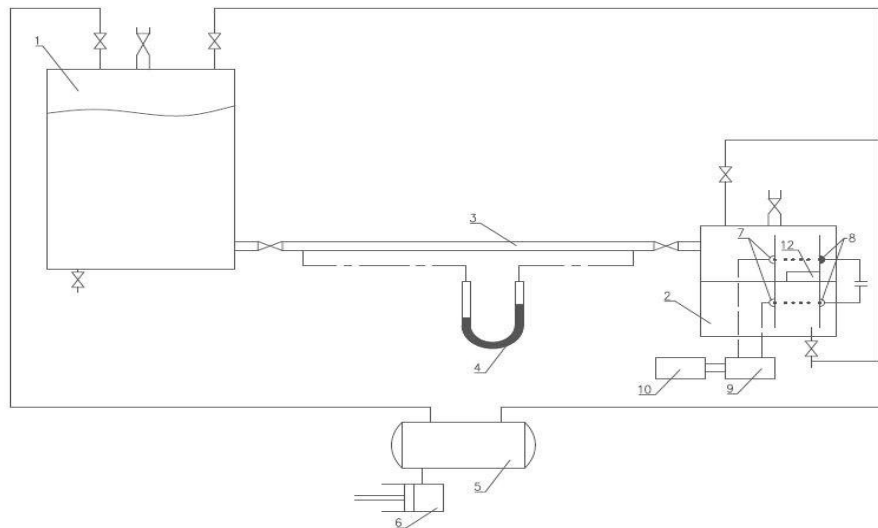
Поліакриламід – високомолекулярний полімер акриламід (амід акрилової кислоти) являє собою безбарвні кристали. Хімічна формула $[\text{CH}_2 \Rightarrow \text{CH}(\text{O})\text{NH}_2]$, молекулярна маса 71,08, температура плавлення $84,5^\circ\text{C}$, температура кипіння 215°C . Тиск пружних парів 0,93 Па при температурі 25°C і 9,3 Па при температурі 50°C . Добре розчинний у воді та спиртах.

Карбоксиметилцелюлоза (КМЦ, целюлозогліколева кислота, $[\text{C}_6\text{H}_7\text{O}_2(\text{OH})_3 - x(\text{OCH}_2\text{COOH})_x]_n$, де $x = 0,08-1,5$) – похідна целюлози, в якій карбоксилметильна група ($-\text{CH}_2-\text{COOH}$) з'єднується з гідроксильною групою глюкозних мономерів. Є слабкою кислотою, безбарвна.

Ефективність застосування ПАА і КМЦ як протитурбулентних присадок досліджувалася в лабораторних умовах при перекачуванні дизельного пального та гасу. Для цього створена експериментальна установка, що складається з витратного іта приймального резервуарів, з'єднаних трубопроводом. З огляду на зниження ефективності присадок при проходженні їх суміші з нафтопродуктом через насос, при проектуванні дослідної установки було вирішено відмовитися від використання насосів. Для забезпечення необхідної витрати по трубопроводу за допомогою компресора створювався надлишковий тиск повітря над поверхнею рідини в видатковому резервуарі, який у процесі експерименту підтримувалося постійним.

Використання стаціонарної моделі, заснованої на застосуванні відомої формули Дарсі-Вейсбаха, дає залежність для визначення коефіцієнта гідравлічного опору під час руху чистого нафтопродукту та його суміші з ПТП. Застосування стаціонарної моделі в умовах нестационарного процесу, викликаного зміною рівня рідини в резервуарі, призведе до певної похибки, величина якої, як показали дослідження, не перевищує 1,5% (що вважається допустимим).

У результаті проведення різних серій експериментів, що відрізняються типом нафтопродукту, типом протитурбулентної присадки а її концентрацією в суміші, отримано результати, наведені у вигляді графіків на рисунку 2.



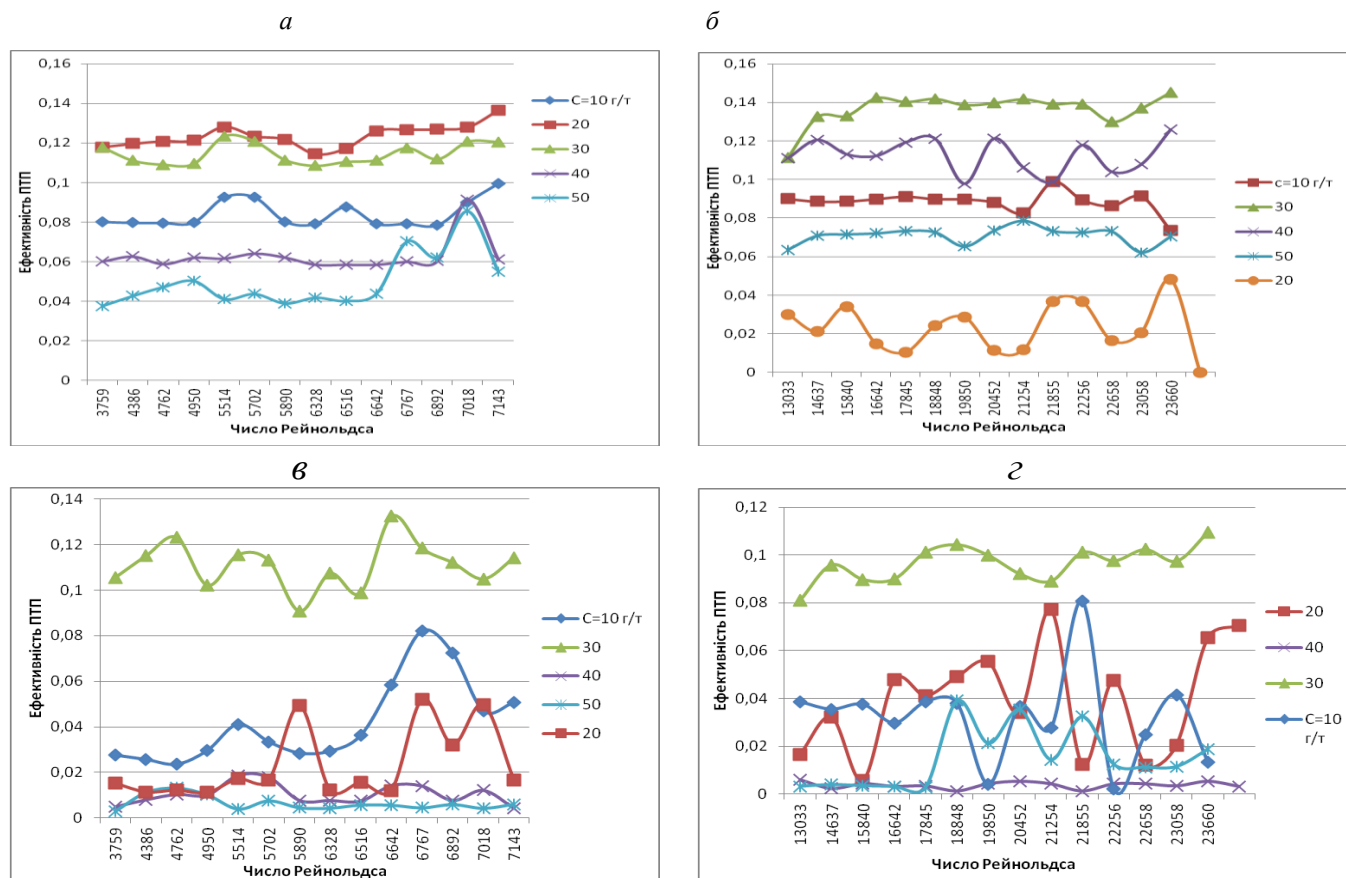
1-роздатковий резервуар; 2 - приймальний резервуар; 3 - випробувальний трубопровід; 4 - дифманометр; 5 - ресивер; 6 - компресор; 7 - фотодіоди; 8 - джерела світла; 9 - реле; 10-електронний секундомір; 11-труба; 12 - поплавок

Рисунок 1 - Принципова схема дослідного стенду

Аналіз отриманих результатів показує, що досліджувані полімери ПАА та КМЦ можуть з успіхом використовуватися в якості протитурбулентних присадок при перекачуванні дизельного пального та гасу магістральними нафтопродуктопроводами, оскільки їх невеликі концентрації в суміші з зазначеними нафтопродуктами зумовлюють зменшення гідравлічного опору, що в кінцевому підсумку призведе до підвищення пропускної здатності трубопроводів і скорочення енерговитрат на перекачування. Слід зазначити, що кожна з розглянутих ПТП поводить в суміші з різними нафтопродуктами (дизельним паливом і гасом) по-різному; загальних закономірностей для встановлення аналітичних закономірностей отримати не вдалося. Найефективнішою виявилася присадка ПАА в суміші з гасом (зниження коефіцієнта гідравлічного опору в діапазоні 10 - 15% залежно від концентрації). Присадка ПАА в дизельному пальному призводить до зниження коефіцієнта гідравлічного опору в межах 10 - 14%. Менш ефективною виявилася присадка КМЦ: у суміші з дизельним паливом спостерігається зниження коефіцієнта гідравлічного опору в межах 9 - 13%, а в суміші з гасом – 9 - 11 %. Застосування стандартних ПТП зарубіжного виробництва здатне знизити гідравлічний опір трубопроводу значно більшою мірою (до 25 - 30%). Однак вони ж відзначають, що головною вимогою до ПТП є чистота полімеру, що позначається на ціні присадок.

Результати дослідів підтверджують положення про те, що зі збільшенням молекулярної маси ПТП по відношенню до щільності нафтопродукту її ефективність зростає. Крім того, збільшення числа Рейнольдса також зумовлює підвищення ефективності присадки. Нарешті, важливим параметром, що визначає ефективність застосування протитурбулентних присадок, є її концентрація в суміші з нафтопродуктом. На рисунку 3 наведені залежності ефективності

протитурбулентних присадок ПАА і КМЦ в суміші з дизельним паливом і гасом при різних концентраціях, побудовані на підставі результатів проведених дослідів.



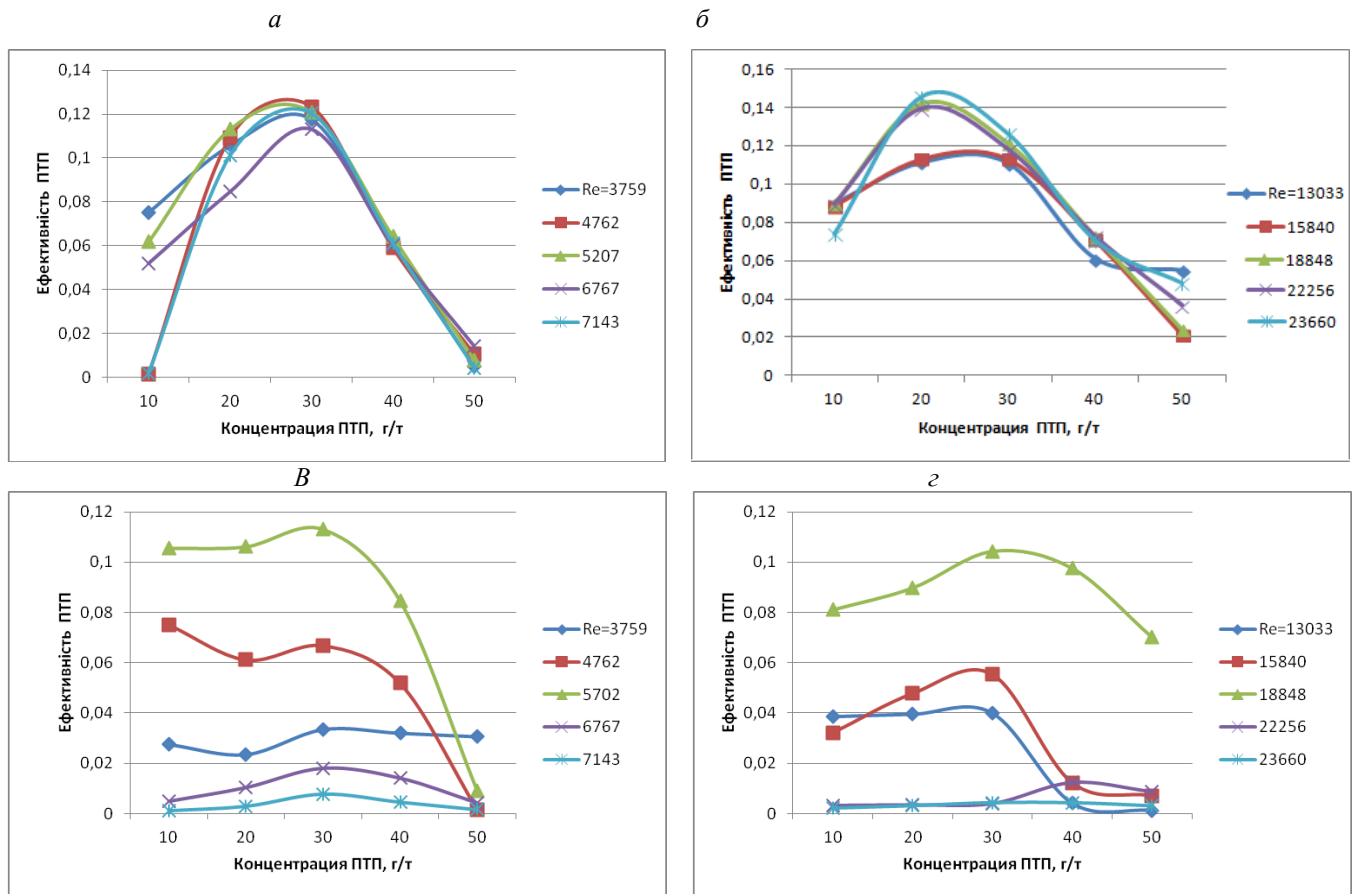
a – дизельне пальне з ПАА; *б* – гас з ПАА; *в* - дизельное пальне з КМЦ; *г* – гас із КМЦ

Рисунок 2 – Залежність ефективності протитурбулентних присадок від числа Рейнольдса

Як видно з графіків, для кожного типу з розглянутих сумішей характерна концентрація, при якій досягається максимальна ефективність ПТП. Для суміші дизельного палива з ПАА оптимальна концентрація знаходиться в межах 20 - 29 г / т і зі збільшенням числа Рейнольдса зростає. При використанні ПАА як протитурбулентної присадки до гасу діапазон оптимальних концентрацій – 19 - 33 г / т і з збільшенням числа Рейнольдса зменшується. Використання КМЦ у суміші з дизельним паливом найбільш ефективно в діапазоні концентрацій 26 - 33 г / т і не залежить від числа Рейнольдса, а при використанні того ж полімеру в суміші з гасом оптимальна концентрація знаходиться в діапазоні 26 - 38 г / т і зі збільшенням числа Рейнольдса зростає.

З метою зниження гідравлічного опору нафтопроводів при транспортуванні нафтопродуктів (дизельного палива і гасу) запропоновано в якості протитурбулентних присадок використовувати високомолекулярні полімери поліакриламід (ПАА) і карбоксиметилцеллюлозу (КМЦ). Проведені серії лабораторних досліджень сумішей зазначених компонентів при різних режимах

перекачування і різних концентраціях дозволили розробити рекомендації щодо вибору типу і концентрації присадок в залежності від режиму течії нафтопродукту.



а)- дизпаливо з ПАА; *б)-* гас із ПАА; *в)-* дизпаливо з КМЦ; *г)-* гас із КМЦ
Рисунок 3 - Залежність ефективності ПТП від концентрації

Широкий вибір різних типів і марок проти турбулентних присадок на світовому ринку вимагає проведення порівняльного аналізу ефективності їх застосування при транспортуванні різних нафт і нафтопродуктів. При цьому йдеться про порівняння не тільки ступеня зниження гідравлічного опору при транспортуванні, але й техніко-економічних показників.

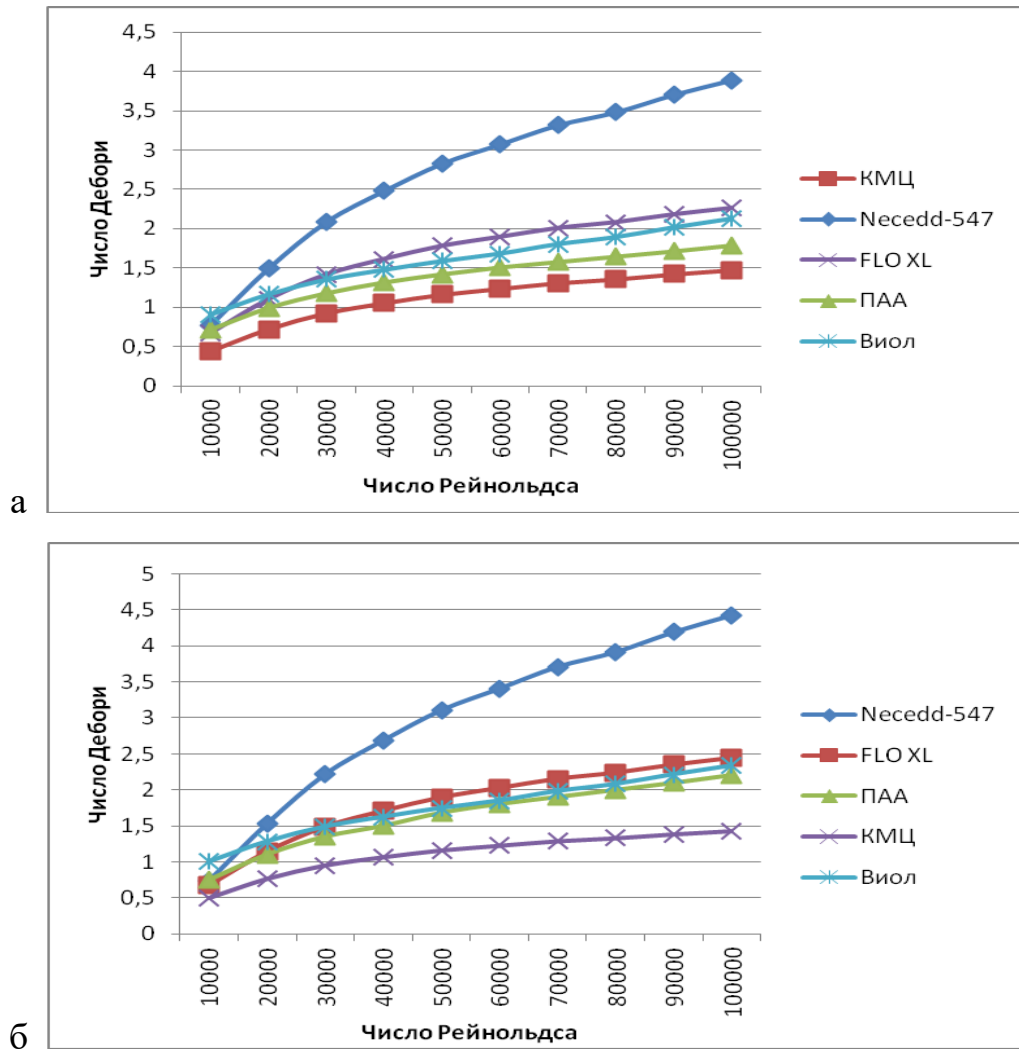
До теперішнього часу такий порівняльний аналіз ефективності застосування ПТП різних типів в літературних джерелах відсутній. Це пов'язано, в першу чергу, з тим, що різні типи протитурбулентних присадок у суміші зі різними видами нафт і нафтопродуктів показують різну ефективність, тобто різний ступінь зниження гідравлічного опору. Навіть використання конкретного типу ПТП в суміші з стандартним нафтопродуктом, але виготовленим з різних нафт різними виробниками показує різну ефективність зниження гідравлічного опору нафтопроводу. По-друге, кожен розробник проводить випробування тільки своєї присадки, а, по-третє, зазначені випробування проводяться в неадекватних умовах. Тому запропоновано використовувати для порівняльного аналізу ефективності різних типів ПТП критерії Рейнольдса Re і Дебори De .

Ефективне число Рейнольдса при турбулентному режимі перекачування нафтопродуктів із протитурбулентними присадками пов'язане з критерієм Дебори залежністю

$$Re = Re_0(1 + De^2). \quad (1)$$

При такій постановці завдання прогнозування величини коефіцієнта гідравлічного опору λ_n при транспортуванні суміші нафтопродукту з ПТП зводиться до розробки методики обчислення числа Дебори De при відомому значенні коефіцієнта гідравлічного опору під час транспортування чистого нафтопродукту λ_0 .

Графіки залежності числа Дебори від числа Рейнольдса для різних ПТП представлені на рисунку 4. Для їх побудови використано літературні дані та результати власних експериментальних досліджень застосування домішок ПАА і КМС в якості ПТП під час перекачування дизельного пального та гасу з оптимальними концентраціями.



а) дизельне паливо; б) гас

Рисунок 4 - Залежність критерія Дебори від критерія Рейнольдса

Аналіз результатів розрахунків показує, що найбільш ефективною присадкою як для транспортування дизельного палива, так і для гасу є Necadd-547. Деякі нижчі показники ефективності присадки FLO XL. Слід зауважити, що ефективність присадок зі зростанням числа Рейнольдса збільшується, що характерно для всіх без винятку ПТП.

Третій розділ присвячено дослідженню нестационарних процесів у нафтопродуктопроводі при використанні протитурбулентних присадок.

Застосування протитурбулентних присадок під час транспортування малов'язких нафтопродуктів магістральними нафтопродуктопроводами дозволяє знизити величину гідравлічних втрат енергії на транспортування продукту, тобто дає змогу економити енерговитрати на транспортування. Однак, введення ПТП у потік призведе до розділу лінійної ділянки трубопроводу на дві частини: одна характеризуватиметься рухом чистого нафтопродукту, а інша - нафтопродукту з ПТП. Гідравлічні втрати в кожній з частин будуть різними. Внаслідок того, що довжина кожної з частин буде постійно змінюватися, характер процесу транспортування системи буде нестационарним доти, поки суміш нафтопродукту з ПТП не заповнить весь трубопровід. При цьому з технологічної точки зору важливо прогнозувати час переміщення рухомої границі та характер режиму роботи нафтоперекачувальної станції.

При реалізації задачі про характер нестационарного процесу, викликаного подачею ПТП в нафтопродуктопровід, вважалося, що зона перемішування продукту з домішкою значно менша від довжини трубопроводу, внаслідок чого її розміром можна знехтувати, вважаючи зону контакту одним перерізом, який рухається трубопроводом.

Ізотермічний характер руху чистого нафтопродукту та його суміші з ПТП описується математичною моделлю, що містить рівняння руху та рівняння нерозривності

$$-\frac{\partial P_j}{\partial x} = \frac{\lambda_j \rho W^2}{2d} ; -\frac{\partial P_j}{\partial t} = c^2 \frac{\partial(\rho W)}{\partial x} , \quad (2)$$

де $P_j(x,t)$ – тиск як функція лінійної координати x і часу t ; λ_j – коефіцієнт гідравлічного опору нафтопроводу; ρ – густина газу; W – усереднена по перерізу швидкість нафти; c – швидкість звуку в потоці; j – індекс, що характеризує положення рухомої границі (значення $j = 1$ стосується простору, що рухається перед рухомою границею, $j = 2$ – за рухомою границею).

Поставлена задача реалізується за наступних умов

- 1) До введення ПТП в потік нафтопродукту рух середовища трубопроводом носив стаціонарний характер із початковим тиском P_H і кінцевим P_K .
- 2) Після введення ПТП у потік нафтопродукту та до завершення кінця процесу заміщення тиск на початку газопроводу підтримується сталим і рівним P_1 , а в кінці підтримувалася стала в часі витрата Q .
- 3) На рухомій границі досягається рівність лінійних швидкостей до і після контакту.
- 4) Необхідно визначити характер руху контакту $l(t)$ у часі, а також встановити характер руху нафтопродукту до та після введення ПТП.

У результаті реалізації математичної моделі отримано залежності для тисків як функцій лінійної координати і часу для кожної з областей у вигляді

$$\begin{aligned}
 P_1(x, t) &= P_1 - \frac{P_1 - P_2}{L} x + \frac{2}{L-l} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \int_0^{L-l} ((P_n - P_1) - ((P_n - P_1) - \right. \\
 &\quad \left. - (P_n - P_2)) \frac{x}{L} \sin \frac{(4n-1)\pi}{2(L-2l)} (L-x) dx \right\} \sin \frac{(4n-1)\pi}{2(L-2l)} (L-x) \exp\left(-\frac{(4n-1)\pi^2 \delta t}{4(L-2l)^2}\right) \\
 P_2(x, t) &= P_1 + \frac{2}{l} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \int_0^l (P_n - P_1) \cos \frac{(4n-1)\pi}{2(L-2l)} x dx \right\} * \\
 &\quad * \cos \frac{(4n-1)\pi}{2(L-2l)} (L-x) \exp\left(-\frac{(4n-1)\pi^2 \delta t}{4(L-2l)^2}\right)
 \end{aligned} \tag{3}$$

Реалізація (3) для визначення характеристик гідродинамічного процесу вимагає представлення закону руху контакту $l(t)$ в аналітичному або числовому вигляді. Однак, цей закон невідомий і підлягає визначенню. Тому запропоновано обчислення здійснювати ітераційним методом. Для цього період руху контакту трубопроводом розбивається на часові відрізки Δt , протягом кожного з яких швидкість руху контакту вважається сталою. Для забезпечення цієї умови проміжки часу Δt можна вибрати достатньо малими.

В початковий момент часу під час роботи газопроводу в стаціонарному режимі з продуктивністю Q_m лінійна швидкість на початку нафтопроводу

$$W_0 = \frac{Q_m}{F_n} . \tag{4}$$

Вважаємо, що швидкість руху контакту в початковий момент руху рівна лінійній швидкості нафтопродукту W_0 . Тоді шлях, пройдений рухомою границею за проміжок часу Δt , становитиме

$$l_0 = W_0 \cdot \Delta t . \tag{5}$$

Як видно з першого рівняння системи (2), лінійна швидкість нафтопродукту

$$W = \left[-\frac{2d}{\lambda \rho} \frac{\partial P_j}{\partial x} \right]^{1/2} . \tag{6}$$

Використавши друге рівняння системи (3), знайдемо похідну $\frac{\partial P_2}{\partial x}$ й уточнимо лінійну швидкість нафтопродукту та пройдений границею контакту шлях за проміжок часу Δt . Після цього за (3) визначаємо тиски в кожній точці нафтопроводу для моменту часу Δt . Для наступного проміжку часу початкове наближення лінійної швидкості газу беремо за уточнене її значення з попереднього проміжку часу.

Аналіз графіків показує, що при сталому тиску на початку нафтопроводу протягом усього періоду руху контакту його швидкість постійно зростає. Це пояснюється зменшенням гідравлічного опору нафтопроводу в часі при збільшенні довжини ділянки, зайнятої сумішшю нафтопродукту з проти турбулентною присадкою. Співвідношення кінцевої по довжині і в часі та початкової швидкостей контакту становить 2.61, що викликає відповідне зростання витрати нафтопродукту.

Однак, при сталому відборі в кінці нафтопроводу нестационарний процес характеризується підвищенням кінцевого тиску за рахунок зменшення гідравлічних втрат.

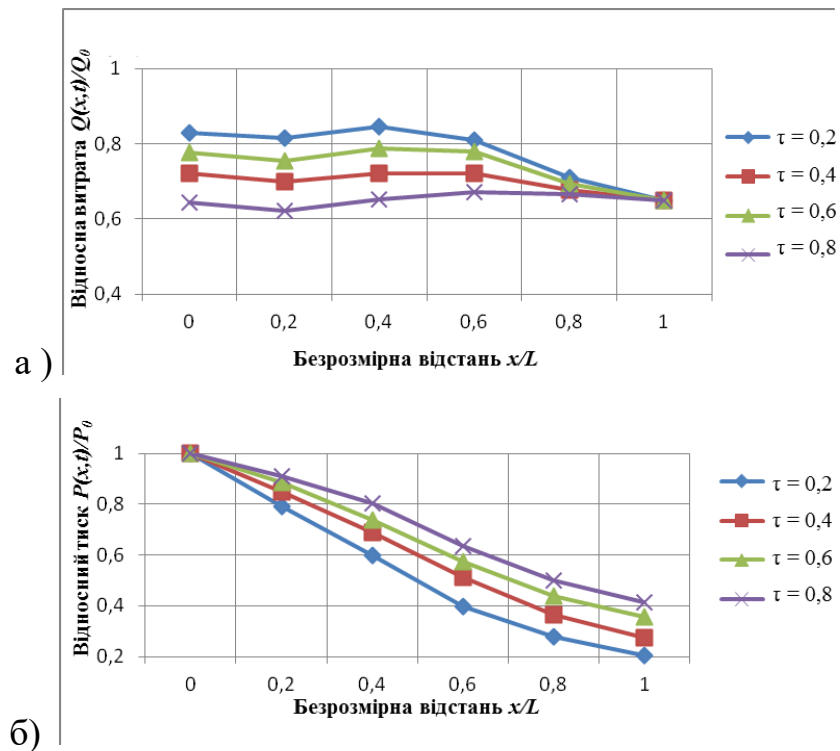


Рисунок 5 - Характер зміни витрати нафтопродукту (а) і тиску в трубопроводі (б) по довжині і в часі

Розрахунки показують, що зростання витрати нафтопродукту на початку трубопроводу складає 1,3 – 1,4 рази по відношенню до початкової, а зростання тиску в кінці ділянки становить 2,0 – 2,1 рази. Це свідчить про високу ефективність використання ПТП в трубопроводному транспортуванні нафтопродуктів.

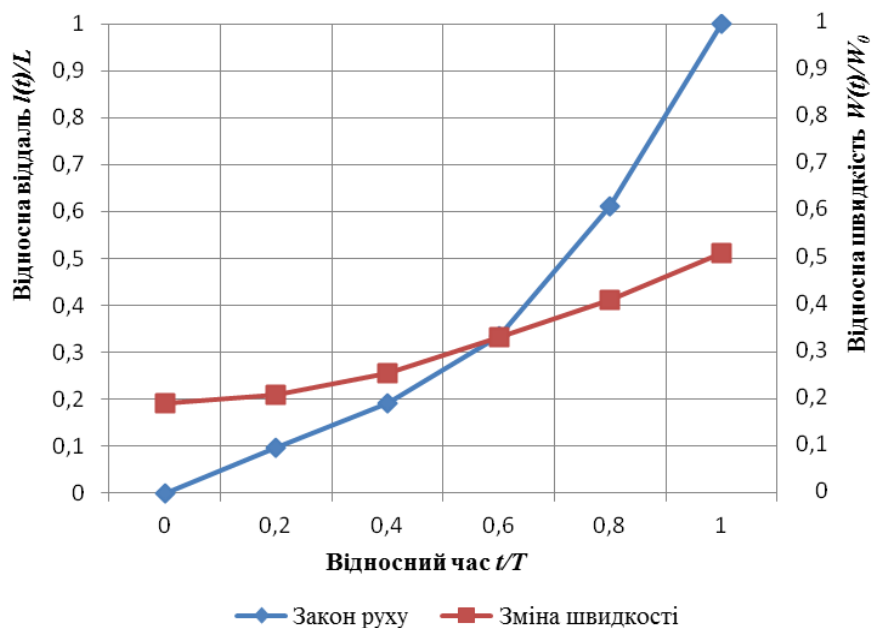


Рисунок 6 – Характер руху контакту чистого нафтопродукту та його суміші з ПТП

При реалізації задачі моделювання нестационарного процесу в нафтопродуктопроводі передбачалося, що тиск на початку ділянки трубопроводу сталий протягом усього процесу заміщення нафтопродукту його сумішшю з ПТП. В реальних випадках на початку лінійної ділянки встановлено перекачувальну станцію, характеристика якої пов'язує напір з продуктивністю в початковій точці

$$H = a - bQ^2 \quad . \quad (7)$$

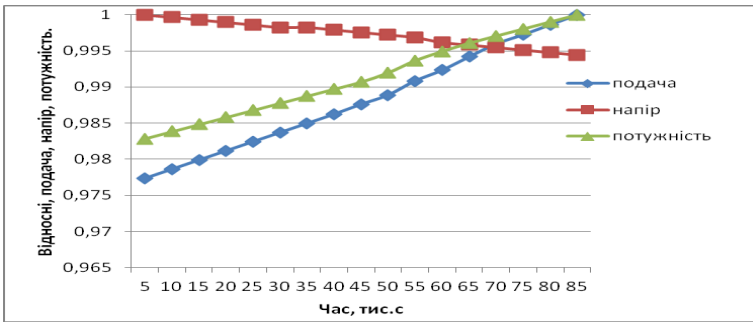
Для умов, коли на початку нафтопродуктопроводу працює насосна станція, створено математичну модель і здійснено її реалізацію в аналітичній формі. В результаті отримано залежності тисків як функцій лінійної координати та часу для для кожної з областей.

Реалізація розв'язку за умови $x=0$, дає змогу визначити зміну напору перекачувальної станції в часі заміщення на лінійній ділянці чистого нафтопродукту його сумішшю з ПТП. Зміну продуктивності НПС в часі можна знайти з характеристики перекачувальної станції. Визначення гідравлічної потужності насосів пропонується здійснювати за загальновідомою методикою. Таким чином, дослідження нестационарних процесів у нафтопродуктопроводі, викликаних заміщенням на лінійній ділянці чистого нафтопродукту його сумішшю з ПТП, дозволяють прогнозувати режим роботи перекачувальної станції для прийняття рішень про можливість регулювання.

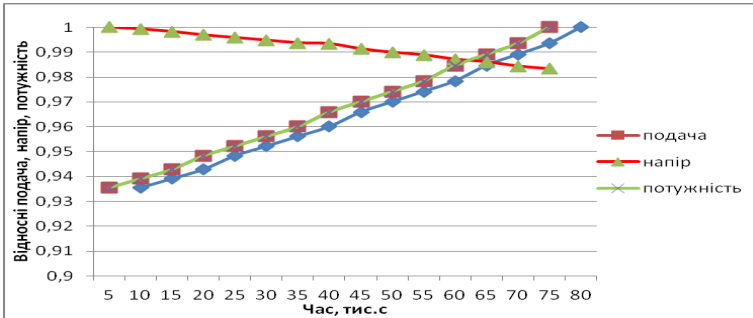
Для реалізації поставленої задачі може бути використаний метод зміни стаціонарних станів, який заздалегідь передбачає деяку похибку в результатах, проте є суттєво простішим. Його суть полягає в тому, що весь період заміщення чистого нафтопродукту його сумішшю з ПТП розбивається на дискретні проміжки часу Δt . Рух рідини впродовж кожного з проміжків Δt вважається стаціонарним, а наприкінці кожного проміжку часу здійснюється стрибкоподібна зміна параметрів процесу.

Результати розрахунків показують, що за стаціонарною методикою розрахунку можливе прогнозування характеру переміщення контактної границі у вигляді, близькому до лінійної функції, в той час як за нестационарною моделлю закон руху - параболічний. Відхилення між відносними координатами переміщення зони контакту досягає максимуму приблизно в середині процесу заміщення і складає 5 – 9%, причому зі зростанням швидкості руху нафтопродукту воно зменшується. Похибка у визначенні параметрів процесу зростає з наближенням до завершення процесу заміщення чистого нафтопродукту його сумішшю з ПТП і досягає максимуму в кінцевий момент часу за подачею 1,5 – 2%, а за напором 1 – 1,5%. Таким чином, аналіз результатів розрахунків, отриманих за різними математичними моделями, доводить можливість використання для практичного прогнозування стаціонарної моделі.

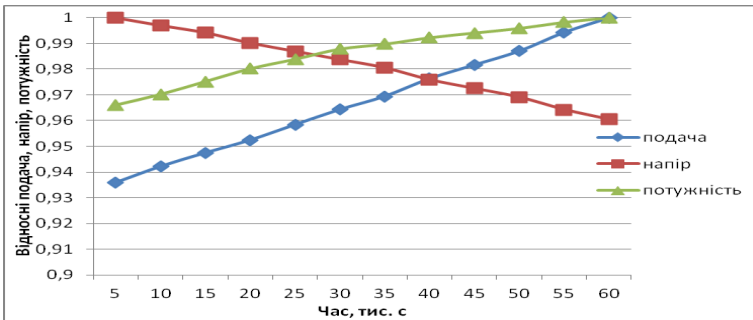
На рисунку 7 наведено графіки зміни параметрів роботи ПС у період заміщення чистого нафтопродукту його сумішшю з ПТП за різної ефективності ПТП і різних схемах перекачування.



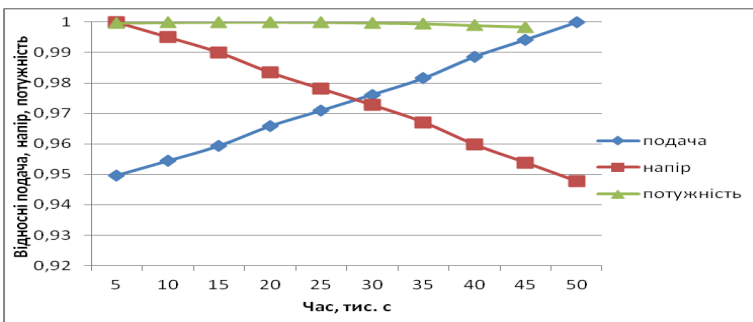
ефективність ПТП 5%, 1 насос;



ефективність ПТП 15%, 1 насос



ефективність ПТП 5%, 2 насоси



ефективність ПТП 15%, 3 насоси

Рисунок 7 – Характер зміни параметрів режиму роботи ПС у процесі заміщення чистого нафтопродукту його сумішшю з ПТП за різних умов

Аналіз результатів показує, що при ефективності присадки 5% подача НПС знаходиться в межах 2,5%, напір знижується на 1,5%, а потужність зростає в середньому на 2%. При ефективності присадки 15% подача зростає на 3%, напір знижується на 1,9%, а потужність зростає в середньому на 2,2%. Збільшення числа послідовно працюючих насосів до двох при ефективності ПТП 15% призводить до зростання подачі на 6,1%, зменшення напору на 4% і зростання потужності 3,3%. При послідовно ввімкнених трьох насосах і ефективності ПТП 15% збільшення подачі досягає 7,4% при зменшенні напору на 5,1%. Потужність як функція часу перекачування має максимум, який відповідає приблизно половині часу періоду заміщення чистого нафтопродукту його сумішшю з ПТП. Використовуючи

результати наведених досліджень, можна планувати оптимізацію режимів роботи нафтопродуктопроводу з застосуванням ПТП.

У **четвертому розділі** розглядаються методи практичного використання протитурбулентних присадок з метою зменшення енерговитрат на перекачування нафтопродуктів і оптимізації режимів роботи нафтопродуктопроводу при цьому.

Ефективність зменшення енергоспоживання за рахунок застосування протитурбулентних присадок визначається, як правило, при збереженні колишньої продуктивності перекачування [5].

Якщо вважати, що в початковому варіанті перекачування здійснювалося N_0 насосами, а після застосування ПТП їх кількість вдалося зменшити до N_1 , то очевидно, що енергоспоживання скоротиться в χ разів, рівне співвідношенню напірних характеристик

$$\chi = \frac{\sum_{i=1}^{N_0} (a_i - b_i Q_0^2)}{\sum_{i=1}^{N_1} (a_i - b_i Q_0^2)} . \quad (8)$$

Використовуючи рівняння балансу напорів для розглянутих випадків до та після введення ПТП у потік нафтопродукту з урахуванням характеристики НПС, можна визначити ефективність використання ПТП

За результатами розрахунків встановлено наступне:

- 1) завдяки введенню протитурбулентної присадки в потік нафтопродукту можна відключити від одного до двох основних насосів;
- 2) кількість електроенергії, яку можна зекономити в результаті введення ПТП на одному з перегонів трубопроводу (за інших рівних умов), зростає в міру збільшення кількості відключених і зменшення сумарної кількості працюючих насосів.
- 3) незалежно від кількості працюючих НПС, завдяки введенню ПТП у потік можна відключити не більше одного основного насоса на кожній;
- 4) для збільшення ефекту економії енерговитрат на перекачування нафтопродукту протитурбулентну присадку необхідно вводити одночасно на всіх перегонах між НПС.

В умовах ринкових відносин єдиним критерієм ефективності застосування ПТП з метою економії енерговитрат на транспортування нафтопродукту слід вважати чистий прибуток нафтотранспортного підприємства, який визначається як різниця надходжень від реалізації нафтопродукту в кінцевій точці трубопроводу і сумарних витрат на транспортування.

Надходження визначаються за приписами ринкової економіки, або ситуаційно, і це диктує концептуально нову схему розв'язання проблеми нормування витрат енергетичних ресурсів на трубопровідний транспорт. Провідна ідея ринкової концепції витрат зводиться до побудови якісно нової інтегрованої системи критеріальних показників ефективності витрат технологічного й економічного походження, в якій домінують економічні фактори.

Очевидно, що втрати напору (тиску) на лінійній ділянці нафтопроводу повинні бути компенсованими за рахунок енергетичних витрат на НПС. Величина енерговитрат на лінійній ділянці визначається товаротранспортною роботою. Для

лінійної ділянки нафтопродуктопроводу еквівалентна товаротransпортна робота розраховується за формулою

$$A = (c^* \Delta P + \Delta Z \rho g). \quad (9)$$

Таким чином, залежність (9) дає змогу побудувати виробничу функцію лінійної ділянки (залежність товаротransпортної роботи від продуктивності) для перекачування чистого нафтопродукту та його суміші з ПТП. Такі залежності подано на рисунку 8 для ділянки ЛВДС 5С-1К системи нафтопродуктопроводів «ПрикарпатЗахідТранс».

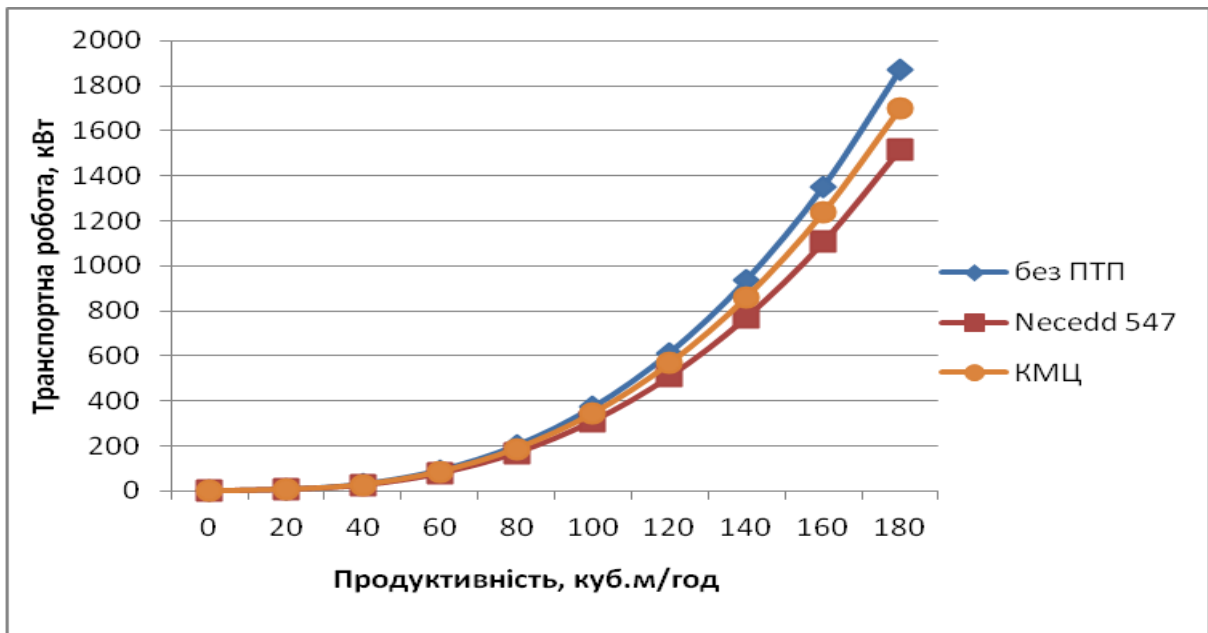


Рисунок 8 - Виробничі функції ділянки ЛВДС 5С-1К системи нафтопродуктопроводів «ПрикарпатЗахідТранс»

Аналіз одержаних результатів дає підстави стверджувати наступне: залежність гідравлічних втрат у лінійних ділянках енергії тиску газу ΔP від обсягів транспортованого продукту Q є нелінійною. Специфічність нелінійної характеристики $\Delta P = f(Q)$ проявляється в тому, що вона є увігнутою. Саме ця її особливість дає можливість віднайти (шляхом порівняння результатів розрахунків надходжень за кількістю транспортованого продукту Q й енергетичних витрат $\Delta P = f(Q)$) оптимальний за показником енергоефективності режим роботи лінійної ділянки нафтопроводу з врахуванням застосування ПТП. Для оптимального режиму роботи лінійної ділянки надходження будуть більші, ніж витрати енергоресурсів із урахуванням витрат на ПТП, які також залежать від продуктивності.

Очевидно, що при фіксованому значенні витрати Q різниця надходжень і затрат на транспортування нафтопродукту становить розмір чистого прибутку транспортного підприємства.

На рисунку 9 приведено побудовані залежності прибутку для максимально та мінімально ефективних проти турбулентних присадок.

Аналіз результатів проведених досліджень показує, що оптимальне значення продуктивності нафтопроводу при транспортуванні нафтопродукту (наприклад, дизельного пального) залежить від ефективності конкретної ПТП в суміші з даним нафтопродуктом і її вартості. Так, при застосуванні протитурбулентної присадки Necedd 547 у суміші з дизельним паливом оптимальна продуктивність складає 111,7 м³/год. При застосуванні КМЦ оптимальна продуктивність зменшується до 98,9 м³/год, (тобто на 11,4%), При цьому прибуток підприємства зменшується на 16,3%. Зауважимо, що при продуктивності нафтопроводу понад 155 м³/год застосування КМЦ не дає економічного ефекту, оскільки витрати на транспортування перевищують надходження від реалізації нафтопродукту. Тому експлуатація нафтопроводу в таких умовах є збитковою.

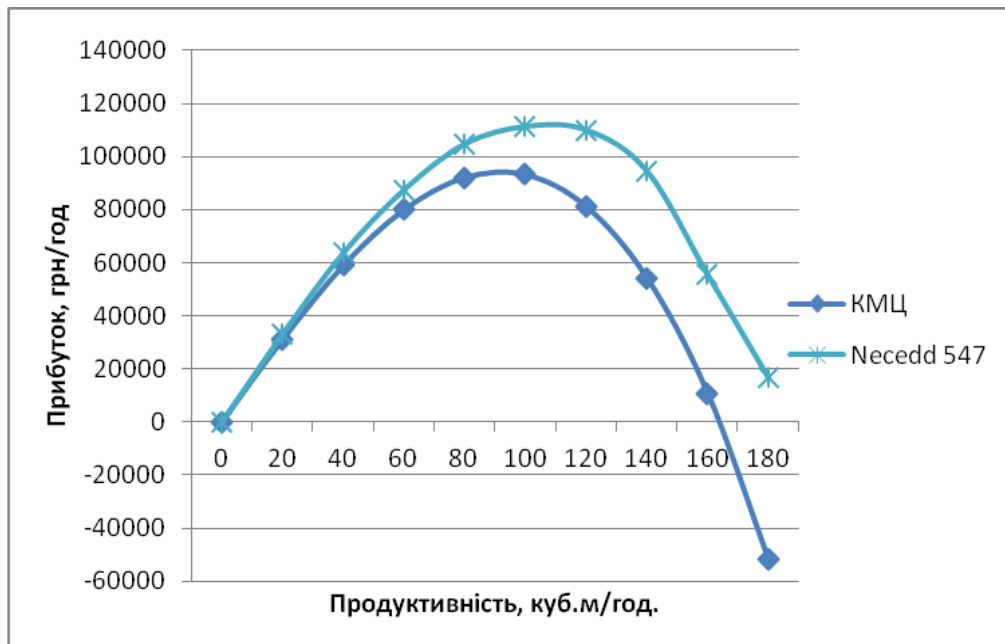


Рисунок 9 – Ефективність застосування різних типів ПТП на ділянці ЛВДС 5С-1К системи нафтопродуктопроводів «ПрикарпатЗахідТранс»

ВИСНОВКИ

На основі проведених досліджень вирішено важливу науково-технічну задачу, яка полягає у встановленні закономірностей зниження гідравлічного опору магістральних нафтопродуктопроводів при використанні протитурбулентних присадок і прогнозуванні режимів експлуатації з метою економії енерговитрат на транспортування, що дозволяє оптимізувати режими роботи за умов ринкових відносин, а саме:

1. На базі результатів експериментальних досліджень доведено можливість використання в якості протитурбулентних присадок поліакриламід та карбоксиметилцелюлози; встановлено оптимальні значення концентрацій вказаних ПТП у суміші з нафтопродуктами – дизельним паливом і гасом.

2. На основі взаємозалежностей між критеріями Дебори та Рейнольдса і ступенем зниження коефіцієнта гідравлічного опору за рахунок використання ПТП проведено порівняльний аналіз ефективності використання різних присадок у

сумішах із нафтопродуктами, на основі якого розроблено рекомендації з вибору типу ПТП у конкретних експлуатаційних ситуаціях.

3. Математичне моделювання нестационарних процесів витіснення з трубопроводу нафтопродукту його сумішшю з ПТП дозволило встановити діапазон зміни параметрів режиму роботи нафтопродуктопроводу.

4. Аналітичні дослідження режимів роботи перекачувальних станцій у процесі перекачування нафтопродуктів із протитурбулентними присадками показали можливість і доцільність використання ПТП з метою економії енерговитрат на транспортування.

5. Експериментальні й аналітичні дослідження закономірностей зниження гідравлічного опору нафтопродуктопроводу при використанні протитурбулентних присадок дозволили створити методику оптимізації режимів роботи перекачувальних станцій в умовах ринкових відносин.

Основний зміст дисертації опубліковано в наступних роботах:

1. Grudz V.Ya. Non-stationary processes in oil-product pipeline using anti-turbulence additives / V.Ya. Grudz, R.S. Al-Dandal // Journal of Hydrocarbon Power Engineering. – 2015, vol. 2, Issue 1. – P. 19 - 23.
2. Аль-Дандал Р.С. Режимы работы нафтопродуктопроводів при використанні протитурбулентних присадок / Р.С. Аль-Дандал // Журнал «Наука и Безопасность». – №2 (20). – 2016. – С. 41-47.
3. Грудз В.Я. Порівняльний аналіз застосування в трубопровідному транспорті нафтопродуктів протитурбулентних присадок різних типів / В.Я. Грудз, Р.С. Аль-Дандал // Нафтогазова галузь України. – 2016. – № 3(21). – С. 16-19.
4. Грудз В.Я. Використання протитурбулентних присадок з метою зменшення енерговитрат на перекачування нафти / В.Я. Грудз, Р.С. Аль-Дандал // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2015. – № 4. – С. 54-59.
5. Грудз В.Я. Исследование влияния противотурбулентных присадок на гидравлическое сопротивление нефтепродуктопровода / В.Я. Грудз, Р.С. Аль-Дандал // Журнал «Системы. Методы. Технологии». – №3 (27). – 2015. – С. 44-50.
6. Грудз В.Я. Режим роботи НПС нафтопродуктопроводу при використанні протитурбулентних присадок / В.Я. Грудз, Р.С. Аль-Дандал // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. – 2015. – № 2. – С. 124-130.
7. Аль-Дандал Р.С. Техніко-економічний аналіз використання протитурбулентних присадок в трубопровідному транспорті нафтопродуктів // Журнал "Ефективна економіка". – 2016. – №7. – Режим доступу до журналу: <http://www.economy.nauka.com.ua>
8. Аль-Дандал Р.С. Оптимізація режимів перекачування нафтопродуктів з використанням проти турбулентних присадок в умовах ринкових відносин // Міжнародна науково-технічна конференція «Машини, обладнання і матеріали для нарощування вітчизняного видобутку та диверсифікації постачання нафти і газу». – ІМ. – 2016. – С. 350-354.

АНОТАЦІЯ

Аль-Дандал Р.С. Рациональні режими експлуатації магістральних нафтопродуктопроводів з використанням протитурбулентних присадок. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.15.13 - Трубопровідний транспорт, нафтогазосховища. Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. – Івано-Франківськ, 2016.

Дисертацію присвячено удосконаленню методів прогнозування режимів роботи нафтопродуктопроводів з застосуванням протитурбулентних присадок з метою економії енергоресурсів в трубопровідному транспорті. Запропоновано використання в якості протитурбулентних присадок полімерні сполуки поліакриламід (ПАА) і карбоксиламідцелюлоза (КМЦ). На основі математичного моделювання досліджено нестационарні процеси в нафтопродуктопроводах при витисненні нафтопродукту з трубопроводу його сумішшю з ПТП. Запропоновано методику оптимізації режимів нафтопродуктопроводу при застосуванні протитурбулентних присадок.

Ключові слова: нафтопродуктопровід, режим, протитурбулентна присадка, енерговитрати, оптимізація.

АННОТАЦИЯ

Аль-Дандал Р.С. Рациональные режимы эксплуатации магистральных нефтепродуктопроводов с использованием протитурбулентных присадок. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.15.13 - Трубопроводный транспорт, нефтегазохранилища. Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа. - Ивано-Франковск, 2016.

Диссертация посвящена совершенствованию методов прогнозирования режимов работы нефтепродуктопроводов с применением противотурбулентных присадок с целью экономии энергоресурсов в трубопроводном транспорте.

Проведенный анализ проблемы снижения энергозатрат на транспортировку нефти на основе литературных источников показал, что одним из эффективных методов снижения энергозатрат на транспортировку нефтепродуктов является снижение гидравлического сопротивления нефтепродуктопроводов путем применения противотурбулентных присадок. В условиях падающей загрузки нефтетранспортной системы критерий минимизации энергозатрат на транспортировку следует считать приоритетным.

Предложено использование в качестве противотурбулентных присадок полимерные соединения полиакриламид (ПАА) и карбоксиламидцелюлоза (КМЦ). На основании анализа результатов экспериментальных исследований свойств противотурбулентных присадок установлены их оптимальные концентрации в смеси с дизельным топливом и керосином, выполнена сравнительная характеристика использования различных ПТП с учетом степени снижения гидравлического сопротивления и их стоимости.

Применение математического моделирования позволило исследовать нестационарные процессы в нефтепродуктопроводах при вытеснении нефтепродуктов из трубопровода его смесью с ПТП. Рассматриваются варианты режимов движения нефтепродукта при различных граничных условиях. Разработана методика расчета режимов работы перекачивающей станции в процессе замещения нефтепродуктов его смесью с ПТП. Аналитические режимы работы нефтеперекачивающих станций в процессе перекачки нефтепродуктов с противотурбулентными присадками показали возможность и целесообразность использования ПТП с целью экономии энергозатрат на транспортировку.

Предложена методика оптимизации режимов нефтепродуктопровода при применении противотурбулентных присадок, учитывающая степень снижения гидравлических потерь в нефтепродуктопроводах и стоимость ПТП. Экспериментальные и аналитические исследования закономерностей снижения гидравлического сопротивления нефтепродуктопровода при использовании противотурбулентных присадок позволили создать методику оптимизации режимов работы насосных станций в условиях рыночных отношений.

Таким образом, на основании проведенных исследований решена важная научно-техническая задача, заключающаяся в установлении закономерностей снижения гидравлического сопротивления магистральных нефтепродуктопроводов при использовании противотурбулентных присадок и прогнозирования режимов эксплуатации с целью экономии энергозатрат на транспортировку, что позволяет оптимизировать режимы работы в условиях рыночных отношений.

Ключевые слова: нефтепродуктопровод, режим, противотурбулентная присадка, энергозатраты, оптимизация.

ABSTRACT

Al-Dandal R.S. The rational regimes of exploitation of main pipelines using anti-turbulence additives. – Manuscript.

The dissertation is submitted for the candidate's degree of the technical sciences (PhD), specialty 05.15.13 - Pipeline transport, oil and gas storages. Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas. – Ivano-Frankivsk, 2016.

The thesis is devoted to improvement of methods of forecasting modes of pipelines using anti-turbulence additives in order to save energy in the pipeline transport. The polymer compound polyacrylamides and carboxylamidescellulose have been offered to use as anti-turbulence additives. The unsteady processes of displacement of petroleum product with its mixture anti-turbulence additives from pipelines have been investigated on the basis of mathematical modeling. It has been offered the method of optimization of oil pipelines in the application anti-turbulence additives.

Keywords: oil pipelines, anti-turbulence additive, energy consumption, optimization.