

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

СТЕЦЬОК СЕРГІЙ МИХАЙЛОВИЧ



УДК 622.691.4: 622.692.4

РОЗВИТОК НАУКОВИХ ОСНОВ ОЧИЩЕННЯ ПРОМИСЛОВИХ
ТРУБОПРОВІДІВ ПОРШНЕВИМИ ЗАСОБАМИ

Спеціальність 05.15.13 – трубопровідний транспорт, нафтогазосховища

Реферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Івано-Франківськ – 2025

Дисертацією є рукопис.

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

Науковий консультант: **Дорошенко Ярослав Васильович**, доктор технічних наук, професор, професор кафедри транспортування та зберігання енергоносіїв Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор,
член-кореспондент НАН України

Звірко Ольга Іванівна,

Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка
Національна академія наук України, м. Львів,
завідувач відділу діагностики корозійно-
водневої деградації матеріалів;

доктор технічних наук, старший науковий співробітник,
член-кореспондент НАН України

Максимов Сергій Юрійович,

Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона
Національна академія наук України, м. Київ,
заступник директора з наукової роботи;

доктор технічних наук, професор

Химко Ольга Мирославівна,

Національний університет «Львівська політехніка»,
м. Львів, професор кафедри автоматизації та
комп'ютерно-інтегрованих технологій.

Захист відбудеться «8» липня 2025 року о 10 годині 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, ауд. 0314.

З дисертацією можна ознайомитись у науково-технічній бібліотеці Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу за адресою: 76019, Україна, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15 та за покликанням <https://nung.edu.ua/departament/spetsializovana-vchena-rada-d2005204/zakhyst-dysertatsiy-051513-truboprovidnyy-transport>.

Реферат розісланий «6» червня 2025 р.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради Д 20.052.04
доктор технічних наук, професор



Андрій ДЖУС

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Обґрунтування вибору теми дослідження. Більшість газових родовищ в Україні перебуває на завершальній стадії розроблення та характеризується високим ступенем виснаження. У цей період значна частина свердловин належить до категорії низькодебітних і функціонує в умовах зниженого пластового тиску, винесення пластових вод, вуглеводневого конденсату та залпових викидів рідини. Зменшення дебітів свердловин призводить до зменшення швидкості газового потоку в шлейфах свердловин і сприяє накопиченню рідкої фази в місцях понижених ділянок. Такі рідинні акумуляції створюють підвищений гідравлічний опір, що знижує пропускну здатність газозбірної мережі, підвищує втрати тиску і спричиняє подальше зменшення робочих тисків на гирлі свердловин та обсягів видобування газу. У поєднанні з несприятливими термобаричними умовами це підвищує ризик утворення гідратів, які можуть частково або повністю закупорювати трубопровід. Крім того, постійна наявність вологи й конденсату в трубах інтенсифікує внутрішньотрубну корозію, що підвищує ризики втрати герметичності і аварійних витоків газу.

У порожнині газопроводів систем розподілу природного газу низького тиску відбувається накопичення продуктів внутрішньотрубної корозії, конденсату, води, метанолу тощо. У трубопроводах теплопостачання й водопровідних мереж домінуючими видами забруднень є оксидні та сульфідні корозійні утворення, мулові фракції, шламові відклади, мінералізовані домішки, пісок і частки ґрунту. Акумуляція забруднень у таких трубопроводах спричиняє прогресивне зростання гідравлічного опору, що безпосередньо впливає на стабільність газопостачання, енерговитрати на транспортування, посилення процесів корозії і збільшення кількості аварій та втрат енергоносіїв. Гідравлічний опір теплопроводів, спричинений накопиченням забруднень, може збільшуватись у декілька разів порівняно з початковим, що призводить до суттєвого збільшення витрати електроенергії на транспортування.

В умовах енергетичної кризи в Україні забезпечення надійного та якісного технічного обслуговування трубопровідних систем, якими транспортуються енергоносії, є критично важливою проблематикою. Необхідні рішення, які б забезпечили збільшення обсягів видобування природного газу, підвищили енергоефективність трубопроводів в умовах недовантаження, зменшили втрати енергоносіїв через аварії. Особливого значення набувають методи технічного обслуговування, які не передбачають втрати транспортованого продукту, тимчасового припинення роботи трубопроводу та не вимагають великих капіталовкладень. У контексті екологічної безпеки пріоритет повинні мати технології, які не призводять до викидів природного газу у довкілля, оскільки, метан є парниковим газом.

Суттєвою технологічною перевагою поршневих засобів очищення порожнини трубопроводів у порівнянні з іншими широко застосовуваними методами є забезпечення ефективного видалення забруднень без втрат транспортованого газу. Така особливість значною мірою посилює актуальність розширення сфер застосування поршневих технологій, особливо в умовах переходу газотранспортних

підприємств до концепції мінімізації виробничо-технологічних втрат та поступової декарбонізації. Додатковою перевагою поршневих засобів є їх низька собівартість, можливість багаторазового використання та адаптація до різних геометричних конфігурацій трубопроводів, що забезпечує високу економічну ефективність їх впровадження.

Закладенням теоретичних основ нестационарних термогазодинамічних процесів, які відбуваються в газопроводах під час руху поршнів, вивченням закономірностей їх руху займались В. Я. Грудз, А. McDonald, F. Esmaeilzadeh, D. Mowla, K. Botros, T. Nguyen та ін. Розробленням саморуйнівних в'язкопружних поршнів для очищення промислових газопроводів займались Р. М. Кондрат, А. В. Угриновський, М. І. Братах, О. В. Костурова, розробленням газодинамічного пристрою для очищення трубопроводів, вузлів запускання/приймання поршнів – І. І. Капцов, В. А. Богуславський та В. П. Гончар.

Сучасні математичні моделі руху поршневих засобів трубопроводами опосередковано враховують контактну взаємодію між поршнем і внутрішньою стінкою трубопроводу, яка для трубопроводів систем збирання та транспортування газу газових родовищ, газових і теплових мереж має ключовий вплив, особливо за умов низьких тисків. Вказаний вплив обумовлений наявністю численних перешкод, які містять трубопроводи систем газозбору і розподілу газу. Такими перешкодами є крутовигнуті відводи, трійники, перехідники з більшого на менший діаметр труб, напливи у порожнину у місці зварних з'єднань тощо. Ці перешкоди суттєво ускладнюють умови руху поршня, змінюють характер навантаження на контактні зони і можуть призводити до застрягання або руйнування поршнів.

Переважає більшість існуючих на сьогодні конструкцій очисних поршнів мають металевий корпус або виготовлені з жорсткого поліуретану, уретану і призначені для магістральних трубопроводів. Тому підібрати поршень для очищення трубопроводів систем збирання та транспортування газу газових родовищ, газових і теплових мереж надзвичайно складно, оскільки розроблені поршні застрягають у таких трубопроводах.

Розроблені конструктивні рішення вузлів запускання/приймання поршнів не відповідають технологічним схемам трубопроводів систем збирання та транспортування газу газових родовищ, газових і теплових мереж, так як призначені для магістральних трубопроводів. Такі вузли важко монтувати, вони не є компактні і не прості у використанні, що суттєво ускладнює їх застосування для трубопроводів систем газозбору і розподілу.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, роботами. Дисертаційні дослідження пов'язані з держбюджетною науково-дослідною програмою ІФНТУНГ і є фрагментом комплексної науково-дослідної роботи “Оптимізація проектування, спорудження та експлуатації трубопровідних систем для підвищення енергоефективності та надійності транспортування енергоносіїв” (держбюджетна науково-дослідна тема ІФНТУНГ 2023 – 2024 роки, номер державної реєстрації 0123U104540). Також дисертаційна робота безпосередньо пов'язана з науково-технічною роботою “Розроблення технологій очищення внутрішньої порожнини та внутрішньотрубного ремонту складних трубопровідних систем” в рамках виконання державного замовлення на найважливіші науково-

технічні (експериментальні) розробки та науково-технічну продукцію за договорами, укладеними у 2023 році (науково-технічна робота за договором ДЗ/147-2023 від 26.10.2023 р., номер державної реєстрації 0123U104368).

Крім того, дисертаційна робота пов'язана з науково-дослідною роботою “Проведення лабораторних досліджень з метою розробки технології очистки внутрішньої порожнини трубопроводів від рідинних забруднень із застосуванням пружного поршня” (господарський договір ІФНТУНГ № НДІ-34 45п-22 від 16.06.2022 р.). Частина досліджень дисертаційної роботи була виконана в межах науково-дослідної роботи № НДР 45.0000618 АТ “Укргазвидобування” філія Український науково-дослідний інститут природних газів “Впровадження технології очистки шлейфів свердловин пружними поршнями”.

Науково-прикладною проблемою, яка вирішується в дисертаційній роботі, є очищення трубопроводів систем збирання та транспортування газу газових родовищ, газових та теплових мереж без виробничо-технологічних втрат енергоносіїв шляхом встановлення закономірностей впливу фізико-механічних властивостей матеріалу та геометричної форми суцільнолитих очисних поршнів із пружних матеріалів на динаміку їх руху трубопровідними системами зі змінною внутрішньою геометрією, на величину запоршневого тиску та ефективність очищення.

Мета дослідження – розвиток наукових основ очищення трубопроводів систем збирання та транспортування газу газових родовищ, газових та теплових мереж шляхом розроблення поршневих засобів із пружних матеріалів, конструктивних рішень із їх запускання/приймання, дослідження ефективності їх роботи та контактної взаємодії із стінкою трубопроводів і фасонних елементів.

Робочі наукові гіпотези сформульовані наступним чином:

- контактна взаємодія пружного поршня зі стінкою трубопроводу істотно впливає на його прохідну здатність, особливо на ділянках із змінною геометрією (відводи, трійники, перехідники, напливи у місці зварних з'єднань тощо), і може бути кількісно описана за допомогою механіко-математичної моделі;

- існує закономірний зв'язок між геометричними параметрами очисних поршнів і пружними характеристиками матеріалів, з яких вони виготовлені, та їх прохідною здатністю і ефективністю очищення трубопроводів, який може бути використаний для удосконалення конструкції поршнів;

- технологія виготовлення поршнів із пружних матеріалів методом лиття у змінні 3D-друковані форми забезпечує точність геометрії, повторюваність характеристик і можливість швидкої адаптації геометричної форми поршня до конкретних умов трубопроводу;

- щоб мінімізувати ризик застрягання поршнів, підбір ефективного очисного поршневого засобу для кожного трубопроводу треба здійснювати послідовним запусканням тестових поршнів, кожен наступний з яких має більшу жорсткість;

- адаптовані до трубопроводів газозбірних і теплових мереж конструктивні рішення вузлів запускання/приймання поршнів дають змогу здійснювати очищення без необхідності демонтажу трубопровідних елементів і зупинки транспортування та масштабувати технологію очищення трубопроводів поршневими засобами.

Завдання наукового дослідження:

- проаналізувати сучасні підходи, технологічні рішення та результати досліджень щодо очищення трубопроводів поршнями від накопичених забруднень;
- розробити механіко-математичну модель контактної взаємодії рухомого поршня із пружного матеріалу зі стінкою трубопроводу змінної внутрішньої геометрії;
- розробити технологію виготовлення очисних поршнів із різних пружних матеріалів різної геометричної форми;
- експериментально дослідити вплив геометричної форми та фізико-механічних властивостей матеріалу очисних поршнів на ефективність очищення та динаміку руху трубопроводами;
- дослідити динамічні та механічні процеси, які відбуваються під час проходження поршнями відводів трубопроводів;
- дослідити закономірності впливу напрямків руху потоків у трійниках і зміни діаметра трубопроводу у перехідниках на кінематичні та механічні процеси руху поршнів;
- розробити конструктивні рішення з запускання/приймання поршнів у трубопроводі систем збирання та транспортування газу газових родовищ, газових і теплових мереж;
- розробити алгоритм виконання робіт із впровадження технології внутрішньотрубного очищення трубопроводів поршнями із пружних матеріалів та апробувати його на трубопроводах систем збирання та транспортування газу газових родовищ та газових і теплових мереж.

Об’єкт дослідження – процеси очищення трубопроводів систем збирання та транспортування газу газових родовищ, газових і теплових мереж.

Предмет дослідження – закономірності та параметри руху поршнів із пружних матеріалів трубопроводами та їх вплив на ефективність очищення.

Методи дослідження. Виконані в роботі дослідження базуються на застосуванні методів аналітичного, чисельного та експериментального дослідження контактної взаємодії рухомого пружного тіла з стінкою трубопроводу із змінною геометрією.

Аналітичні дослідження контактної взаємодії очисного поршня із пружних матеріалів із стінкою трубопроводу під час руху у звичайних умовах та долаття перешкод (відводів, конусних перехідників із більшого на менший діаметр труб та виступів у порожнину у місці наплавлення в зоні кільцевого зварного шва) виконано механіко-математичним моделюванням. Ключовими позиціями моделі є квазістатична постановка та урахування поперечної стисливості пружного стержня за рахунок ефекту Пуассона. Очисні поршні різної геометричної форми із силіконового компаунда та поліуретану виготовлено методом литтям у надруковані на 3D принтері ливарні форми. При цьому ливарні форми моделювали на основі розроблених 3D моделей очисних поршнів. Для експериментального визначення ефективності очищення трубопроводу кожним дослідним зразком поршня, дослідження динаміки їх руху розроблено та змонтовано експериментальні установки із скляних труб, які містять протяжні горизонтальні та понижені ділянки. Дослідження впливу місцезнаходження поршня у відводі трубопроводу,

геометричної форми його заднього торця та коефіцієнта динамічного тертя на розподіл еквівалентних напружень Мізеса в ньому та на його деформації виконано чисельним моделюванням із застосуванням моделі гіперпружності Йоо. Визначення умов руху поршнів із пружних матеріалів без зупинок відводами трубопроводів виконано експериментально та аналітичним методом шляхом визначення сил, які діють на поршень у тангенціальному напрямку. Такий підхід дав змогу записати рівняння руху поршня та визначити тангенціальне прискорення поршня у відводі трубопроводу. Динаміку руху, деформації дослідних зразків очисних поршнів із пружних матеріалів у крутовигнутих відводах, трійниках і перехідниках трубопроводів досліджено експериментально, для чого розроблено і змонтовано експериментальні установки із скляних і металевих труб та фасонних елементів.

Основні висновки роботи узгоджуються з відповідними даними теоретичних та експериментальних досліджень.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, результатів та висновків базується на використанні фундаментальних законів механіки пружного деформованого тіла, контактної взаємодії, виконанні багаторазових лабораторних експериментів та промислової апробації із використанням фізичних моделей трубопроводів та серії дослідних зразків поршнів із варіативними геометричними і пружними характеристиками. Усі конструктивні розробки експериментально перевірені на спеціально розроблених дослідних установках та в реальних умовах трубопроводів.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в отриманні якісно нових закономірностей щодо впливу фізико-механічних властивостей матеріалу та геометричної форми суцільнолитих очисних поршнів із пружних матеріалів на динаміку їх руху трубопроводами з змінною внутрішньою геометрією, деформації, запоршневий тиск, ефективність очищення та визначається такими положеннями:

– **вперше:**

а) визначено закономірності впливу лобового опору, натягу, тертя, модуля пружності та геометричних розмірів очисного поршня виготовленого із пружного матеріалу на його напружений стан та величину запоршневого тиску під час руху трубопроводом із постійним внутрішнім діаметром та локальними звуженнями з урахуванням поперечної стисливості, що дозволило сформулювати рекомендації до розроблення поршнів;

б) встановлено закономірності впливу геометричної форми та фізико-механічних властивостей матеріалу очисних поршнів на їх деформації та напружений стан, розподіл контактних сил і величину запоршневого тиску під час руху фасонними елементами трубопроводів (відводи, трійники, перехідники з більшого на менший діаметр труб), що дозволило встановити, за яких умов вони не будуть застрягати у таких елементах трубопроводів;

в) визначено закономірності впливу фасонних елементів трубопроводних систем, напрямків руху потоків у їх порожнині (для трійників) на динаміку руху ними очисних поршнів виготовлених із пружних матеріалів, на основі чого розроблено конструктивні рішення із запускання-приймання поршнів у трубопроводи, рекомендації з визначення маршруту руху поршнів трубопроводами;

г) запропонована науково обґрунтована та підтверджена результатами експериментальних досліджень розрахункова залежність для визначення мінімально допустимої швидкості руху поршня на вході у відвід трубопроводу, що дозволило визначити допустиму довжину поршня та режимні параметри роботи трубопроводу під час його очищення поршнями;

– **набуло подальшого розвитку** вивчення закономірностей впливу фізико-механічних властивостей матеріалу очисних поршнів, їх геометричної форми, швидкості руху на ефективність очищення горизонтальних і понижених ділянок трубопроводів від рідинних забруднень, що дало змогу розробити методологію прогресивної валідації поршня;

– **розширено наукові знання** про перетікання через поршень, прохідну здатність та динаміку руху поршнів трубопроводами, які містять місцеві перешкоди, зокрема виступи у порожнину, що дозволило здійснити коректування геометричної форми дослідних зразків очисних поршнів для підвищення їх прохідної здатності.

Сукупність одержаних наукових результатів складає наукові основи очищення газозбірних та розподільних трубопроводів очисними пристроями.

Наукові положення, сформовані на основі наукових результатів:

– контактна взаємодія пружного очисного поршня з внутрішньою стінкою трубопроводу істотно впливає на величину запоршневого тиску, розподіл напружень та деформації поршня;

– раціональне поєднання геометричної форми очисного поршня та пружних властивостей матеріалу з якого він виготовлений є ключовим чинником, що визначає ефективність очищення трубопроводів і мінімізує ризик його застрягання, особливо в місцях перешкод (відводи, трійники, перехідники, локальні звуження тощо);

– вдосконалення конструкцій вузлів запускання/приймання поршневих засобів можливе на основі встановлення закономірностей динаміки руху пружних поршнів фасонними елементами трубопроводів, зокрема трійниками та перехідниками з більшого на менший діаметр труб;

– розроблена методика прогресивної валідації очисного поршня шляхом поетапного запускання серій зразків із варіативними геометричними параметрами та пружними характеристиками узагальнює результати роботи і є подальшим розвитком використання поршневих засобів для очищення трубопроводів.

Наукове значення роботи полягає в розробці теоретичного підґрунтя для підвищення ефективності очищення трубопроводів без виробничо-технологічних втрат газу шляхом раціональної організації процесів підбору поршневих засобів із урахуванням їхньої взаємодії з стінкою трубопроводу, режимних параметрів його роботи, конфігурації фасонних елементів та шляхом оптимізації конструктивних і технологічних рішень вузлів запускання/приймання поршнів.

Практичне значення одержаних результатів. Результати досліджень є корисними для забезпечення можливості очищення газозбірних та розподільних трубопроводів поршневими засобами. Такі заходи дають змогу стабілізувати, збільшити обсяги видобування газу, підвищити енергоефективність трубопроводів, зменшити втрати енергоносіїв через аварії, запобігти гідратоутворенню та звести до мінімуму втрати газу під час очищення. Отримані результати забезпечують

можливість здійснювати запускання/приймання очисних поршнів у незапроектовані для цього трубопроводи, підібрати максимально ефективний поршень для кожного трубопроводу, спланувати маршрут його руху трубопроводом і максимально запобігти його застряганню та руйнуванню.

Виконані в дисертаційній роботі теоретичні й експериментальні дослідження дали змогу розробити технологічну інструкцію з внутрішньотрубного очищення трубопроводів поршнями із пружних матеріалів.

Результати виконаних досліджень, зокрема розроблені технології виготовлення суцільнолитих очисних поршнів із різних пружних матеріалів різної геометричної форми, технології їх запускання в трубопровід і приймання з нього, аналітичні та експериментальні матеріали щодо ефективності їх застосування та динаміки руху прямолінійними ділянками, відводами, трійниками і перехідниками трубопроводів промислово апробовані та впроваджені в ГПУ "Шебелинкагазвидобування" АТ "Укргазвидобування".

Результати досліджень використовуються у навчальному процесі кафедри транспортування та зберігання енергоносіїв Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу під час викладання дисциплін "Спорудження магістральних трубопроводів", "Спорудження об'єктів магістрального трубопроводного транспорту" для студентів спеціальності 185 – "Нафтогазова інженерія та технології".

Особистий внесок здобувача. Усі положення і висновки, математичні моделі та методи розрахунків, аналітичні залежності та результати розрахунків, що виносяться на захист, розроблені автором особисто. У працях, опублікованих у співавторстві, особисто автором:

- описано причини наявності рідинних забруднень у порожнині газопроводів, встановлено їх вплив на величину гідравлічного опору, визначено місця найімовірнішого накопичення, виконано аналіз методів і технологій їх видалення з газопроводів, обґрунтовано необхідність декарбонізації нафтогазової галузі [6, 7, 12, 13, 15, 16, 18–20, 33];

- створено аналітичну та чисельну модель руху пружного очисного поршня трубопроводом. Встановлено закономірності впливу довжини поршня, форми його заднього торця, коефіцієнту тертя та коефіцієнту Пуассона на величину запоршневого тиску, напружений стан поршня [2, 3, 28–30];

- розроблено технології виготовлення очисних поршнів із пружних матеріалів, експериментально досліджено динаміку їх руху трубопроводами, визначено чинники, які впливають на ефективність очищення, розроблено план прогресивної валідації поршня [8, 14, 17, 25, 26, 31, 32, 34–36];

- досліджено динаміку руху очисних поршнів фасонними елементами трубопроводів, визначено контактні сили нормальної реакції, сили тертя, величину необхідного запоршневого тиску для їх проходження, вплив місцезнаходження поршня у відводі на величину максимальних еквівалентних напружень Мізеса в поршні [1, 3–5, 10, 11, 27, 37];

- розроблено конструктивні рішення для запускання і приймання очисних поршнів у трубопроводи систем газозбору і розподілу, а саме: камери запускання,

камери приймання та видалення поршнів із трубопроводів, вузли під'єднання мобільних камер запускання та приймання очисних поршнів [9, 21–24].

У наукових працях, опублікованих у співавторстві, дисертанту належить фактичний матеріал і основний творчий доробок. Автор брав безпосередню участь у плануванні та виконанні експериментальних досліджень, промисловій апробації та впровадженні результатів дисертаційної роботи у виробництво, здійснив аналіз їх результатів. Усі наукові узагальнення, положення, результати, висновки та рекомендації, викладені в дисертації, виконані автором особисто.

Апробація результатів дисертації. Основні положення роботи викладено й обговорено на наукових конференціях різного рівня: Міжнародній науково-практичній конференції “Стан, проблеми та перспективи нафтогазової промисловості України” (м. Борислав, 7–9 вересня 2012 р.); тридцять четвертій науковій сесії наукового товариства ім. Шевченка (м. Івано-Франківськ, 01–17 березня 2023 р.); другій Міжнародній науково-практичній конференції молодих учених “Стратегічні орієнтири сталого розвитку в Україні та світі” (м. Чернігів, 21 квітня 2023 р.); тридцять п'ятій Міжнародній науково-практичній конференції “Modern methods of solving scientific problems of reality” (м. Варна, 5–8 вересня 2023 р.); тридцять п'ятій науковій сесії наукового товариства ім. Шевченка (м. Івано-Франківськ, 04–23 березня 2024 р.); дев'ятому Міжнародному молодіжному конгресі “Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування” (м. Львів, 28–29 березня 2024 р.); Міжнародній науково-технічній конференції “Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні. ITMM 2024” (м. Дніпро, 10–11 квітня 2024 р.); Всеукраїнській науково-практичній конференції здобувачів і молодих вчених “Сталий розвиток: виклики та реалії здійснення (Україна-світ)” (м. Івано-Франківськ, 22 травня 2024 р.); чотирнадцятій Міжнародній науково-практичній конференції “Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС–2024)” (м. Чернігів, 23–24 травня 2024 р.); другій Міжнародній науково і теоретичній конференції “Scientific review of the actual events, achievements and problems: collection of scientific papers” (м. Берлін, 31 травня 2024 р.); одинадцятій Міжнародній науковій конференції “Математичні проблеми механіки неоднорідних структур” (м. Львів, 24–26 вересня 2024 р.); Міжнародній науковій конференції “Математичні проблеми технічної механіки” (м. Дніпро, 17–19 вересня 2024 р.); Міжнародній науковій конференції “Механіка: сучасність і перспективи – 2024” (м. Київ, 7–11 жовтня 2024 р.).

Результати дисертаційної роботи в повному обсязі представлено на науковому семінарі кафедри транспортування та зберігання енергоносіїв у 2024 році та розширеному науковому семінарі кафедри транспортування та зберігання енергоносіїв Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу в 2025 році.

Публікації. Основні положення та результати проведених досліджень опубліковано в 37 друкованих наукових працях, із яких: 7 – у іноземних міжнародних наукових журналах, що індексуються у наукометричній базі даних Scopus; 13 – у наукових фахових виданнях (з них 6 без співавторів); 4 – патенти

України на корисну модель (1 без співавторів); 13 – у збірниках матеріалів і тез доповідей на міжнародних і всеукраїнських конференціях.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота містить вступ, сім розділів, загальні висновки, список використаних джерел та чотири додатки. Роботу викладено на 403 сторінках машинописного тексту, обсяг основного тексту дисертації складає 289 сторінок. Роботу проілюстровано 196 рисунками та 10 таблицями. Список використаних джерел містить 302 найменування, із яких 86 кирилицею та 216 латиницею.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано вибір теми досліджень, наведено зв'язок роботи з науковими програмами, планами, роботами, визначено мету, об'єкт і предмет дослідження, завдання досліджень. Аргументовано наукову новизну одержаних результатів дисертаційної роботи, зазначено практичну цінність результатів дисертаційної роботи і вказано особистий внесок у них здобувача. Наведені дані про апробацію отриманих результатів, публікації, які відображають основний зміст дисертаційної роботи, структуру та обсяг дисертаційної роботи.

У **першому розділі** *“Аналіз результатів досліджень та технологічних рішень щодо очищення трубопроводів поршнями від накопичених забруднень”* виконано аналіз конструктивних особливостей поршнів для очищення трубопроводів, подано їхню класифікацію, розглянуто матеріали з яких їх виготовляють, геометричні форми та основні сфери використання. Виконано аналіз підходів і результатів досліджень динаміки руху поршнів як прямолінійними ділянками трубопроводів, так і їх фасонними елементами, методики визначення контактних сил, сил тертя та аналізу їх деформацій і напруженого стану. Оцінено придатність існуючих конструктивних рішень із запускання/приймання поршнів у трубопроводи до використання в умовах систем збирання та транспортування газу газових родовищ, газових і теплових мереж.

На основі аналізу літературних джерел сформовано завдання дисертаційної роботи. Першочерговими є дослідження контактної взаємодії рухомого поршня із пружного матеріалу зі стінкою трубопроводу змінної внутрішньої геометрії, розроблення на їх основі технології виготовлення очисних поршнів із різних пружних матеріалів різної геометричної форми, експериментальне дослідження впливу геометричної форми та фізико-механічних властивостей матеріалу очисних поршнів на ефективність очищення та динаміку руху трубопроводами, дослідження динамічних та механічних процесів, які відбуваються під час проходження поршнями відводів, трійників та перехідників трубопроводів, розроблення конструктивних рішень із запускання/приймання поршнів у трубопроводи систем збирання та транспортування газу газових родовищ, газових і теплових мереж, розроблення алгоритму виконання робіт із впровадження технології внутрішньотрубного очищення трубопроводів поршнями із пружних матеріалів та апробування її в умовах трубопроводів систем збирання та транспортування газу газових родовищ та газових і теплових мереж.

У другому розділі “Теоретичний аналіз руху суцільнолитих очисних поршнів із пружних матеріалів трубопроводами” розроблено механіко-математичні моделі руху суцільнолитого пружного очисного поршня трубопроводом із змінною внутрішньою геометрією. Побудовано аналітичний розв’язок задачі контактної взаємодії пружного поршня з осесиметричним звуженням труби, на основі якого отримано окремі рішення для випадків руху пружного поршня прямолінійною ділянкою трубопроводу із незмінним внутрішнім діаметром, руху запасованого в трубопроводі поршня з рівномірним натягом та проходження поршнем напливу у порожнину трубопроводу в місці зварного шва. Досліджено вплив лобового опору, натягу, тертя, пружних модулів матеріалу та геометричних розмірів поршня на його напружений стан та величину запоршневого тиску. Розроблено рекомендації щодо проектування поршнів із пружних матеріалів.

Сформовано задачу руху суцільнолитого циліндричного пружного поршня радіусом R та довжиною l прямолінійною ділянкою трубопроводу радіусом R та малим осесиметричним звуженням, яке описується нерівномірним радіальним натягом $\delta \ll R$ (рис. 1). Під дією запоршневого тиску p_0 пружний поршень рухається трубопроводом і долає лобовий опір p_l та дотичні сили опору, спричинені фрикційним проковзуванням бічної поверхні вздовж стінки труби.

Дослідження виконано у квазістатичній постановці, нехтуючи силами інерції. Деформації пружного поршня вважаються малими, а стінка труби – абсолютно жорсткою.

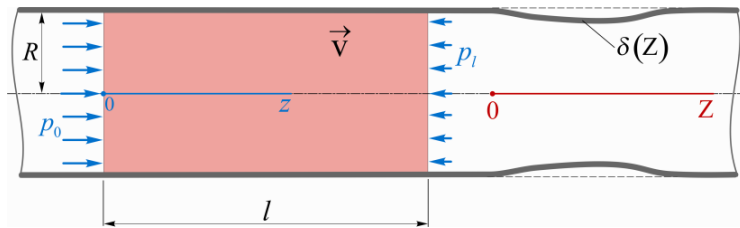


Рисунок 1 – Схема руху очисного поршня трубопроводом у місці осесиметричного звуження

Побудовано одновимірну розрахункову модель руху пружного поршня:

– припущення про розподіл напружень і переміщень у перерізі

$$\sigma_r(r, z) = \sigma_\theta(r, z) = \sigma(z), \quad \sigma_z(r, z) = \sigma_z(z), \quad \tau_{rz}(r, z) = \tau(z)r/R; \quad (1)$$

$$u_r(r, z) = w(z)r/R, \quad u_z(r, z) = u(z); \quad (2)$$

– усереднене за поперечним перерізом поршня рівняння рівноваги

$$\frac{d\sigma_z}{dz} + 2\frac{\tau}{R} = 0, \quad z \in (0, l); \quad (3)$$

– співвідношення Коші

$$\varepsilon_r = \varepsilon_\theta = \frac{w}{R}, \quad \varepsilon_z = \frac{du}{dz}; \quad (4)$$

– усереднений закон Гука

$$\varepsilon_r = \varepsilon_\theta = \frac{1}{E}((1-\nu)\sigma - \nu\sigma_z), \quad \varepsilon_z = \frac{1}{E}(\sigma_z - 2\nu\sigma); \quad (5)$$

– умови фрикційного контакту з нерівномірним натягом на бічній поверхні

$$w + \delta(z) = 0, \quad \tau = (f + \delta'(z))\sigma, \quad \sigma < 0; \quad (6)$$

– крайову умову на передньому (правому) кінці поршня

$$\sigma_z(l) = -p_l; \quad (7)$$

– еквівалентне напруження Мізеса

$$\sigma_{eq}(r, z) = \sqrt{(\sigma(z) - \sigma_z(z))^2 + 3(\tau(z)r/R)^2}, \quad (8)$$

де σ, τ – нормальне та дотичне контактні напруження на бічній поверхні поршня, σ_z – середнє осьове напруження в поршні, $\varepsilon_r, \varepsilon_\theta, \varepsilon_z$ – нормальні деформації, u, w – осьове та радіальне переміщення бічної поверхні, E, ν – модуль Юнга та коефіцієнт Пуассона матеріалу поршня, f – коефіцієнт тертя пари труба–поршень. Штрихом позначено похідну за осью координатою $\delta'(z) = \frac{d\delta(z)}{dz}$.

Визначено контактні та еквівалентні напруження на бічній поверхні поршня

$$\sigma(z) = \frac{1}{1-\nu} \left(\nu \sigma_z(z) - E \frac{\delta(z)}{R} \right), \quad \tau(z) = (f + \delta'(z)) \sigma(z), \quad (9)$$

$$\sigma_{eq}(R, z) = \sqrt{(\sigma(z) - \sigma_z(z))^2 + 3\tau^2(z)}, \quad (10)$$

та величину запоршневого тиску, необхідну для руху поршня

$$p_0 = -\sigma_z(0) = p_l e^{F(l)} + \frac{E}{\nu} \int_0^l e^{F(\zeta)} F'(\zeta) \frac{\delta(\zeta)}{R} d\zeta. \quad (11)$$

Загалом, напруження в поршні, зокрема опір його руху, мають дві складові: фрикційну, пропорційну до лобового опору та залежну від приросту натягу і деформаційну, пропорційну жорсткості поршня та залежну від натягу і кута атаки.

Найпростішим випадком застосування аналітичного розв'язку такої задачі є рух поршня трубопроводом, який не містить перешкод. Поперечні розміри поршня і трубопроводу рівні (натяг відсутній, $\delta=0$), а опір руху поршня спричинений тільки фронтальним засміченням ($p_l \neq 0$) (рис. 2).

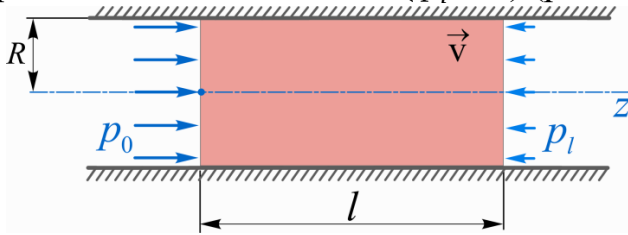


Рисунок 2 – Схема руху очисного поршня трубопроводом

Для цього випадку

$$F(z) = \lambda z, \quad \lambda = \frac{2\nu}{1-\nu} \frac{f}{R}. \quad (12)$$

Отримано

$$\sigma_z(z) = -p_l e^{\lambda(l-z)}, \quad \sigma(z) = -\frac{\nu}{1-\nu} p_l e^{\lambda(l-z)}, \quad \tau(z) = -\frac{f\nu}{1-\nu} p_l e^{\lambda(l-z)}; \quad (13)$$

$$\sigma_{eq}(R, z) = \frac{\sqrt{(1-2\nu)^2 + 3f^2\nu^2}}{1-\nu} p_l e^{\lambda(l-z)}, \quad p_0 = p_l e^{\lambda l}. \quad (14)$$

Розраховано еквівалентні напруження Мізеса на бічній поверхні поршня (рис. 3), встановлено закономірності впливу довжини поршня, коефіцієнта тертя та коефіцієнта Пуассона на максимальні еквівалентні напруження (рис. 4) та на

величину запоршневого тиску, необхідного для руху поршня трубопроводом (рис. 5).

Наступною розглянуто задачу руху поршня, запасованого в трубопровід з рівномірним натягом $\delta(z) = \text{const} > 0$ (рис. 6). Тоді $\delta'(z) = 0$, $F(z) = \lambda z$, $F'(z) = \lambda$. Отримано

$$\sigma_z(z) = -\frac{E}{\nu} \frac{\delta}{R} \left(e^{\lambda(l-z)} - 1 \right), \quad \sigma(z) = -\frac{E}{1-\nu} \frac{\delta}{R} e^{\lambda(l-z)}, \quad \tau(z) = -\frac{fE}{1-\nu} \frac{\delta}{R} e^{\lambda(l-z)}; \quad (15)$$

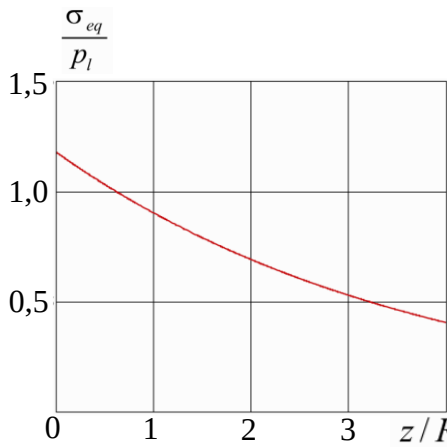


Рисунок 3 – Розподіл еквівалентних напружень Мізеса на бічній поверхні поршня

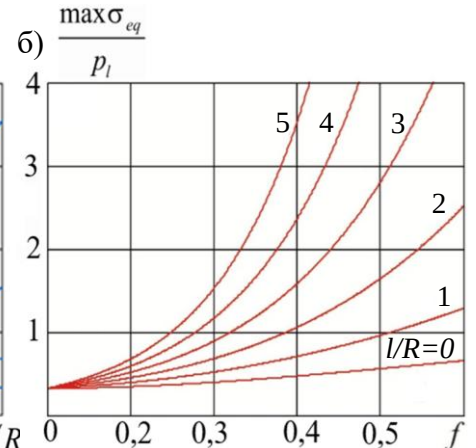
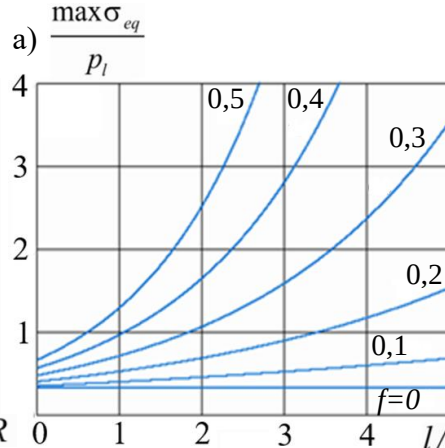


Рисунок 4 – Залежність максимальних еквівалентних напружень від: а) – довжини поршня; б) – коефіцієнта тертя

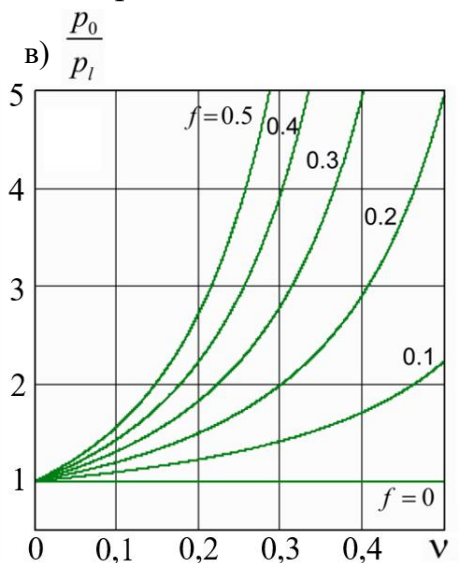
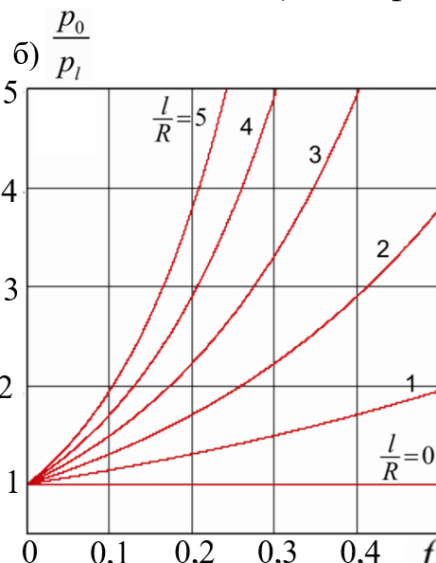
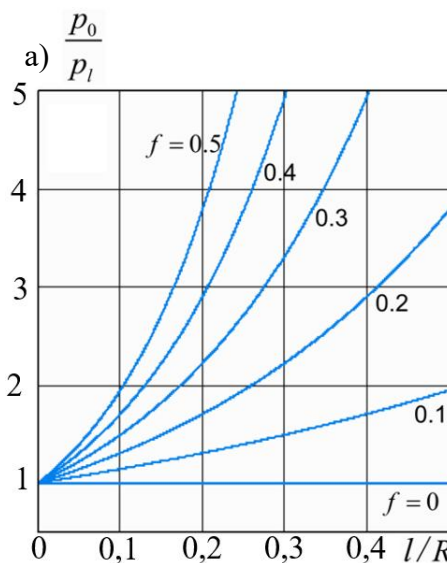


Рисунок 5 – Залежність запоршневого тиску від: а) – довжини поршня; б) – коефіцієнта тертя; в) – коефіцієнта Пуассона

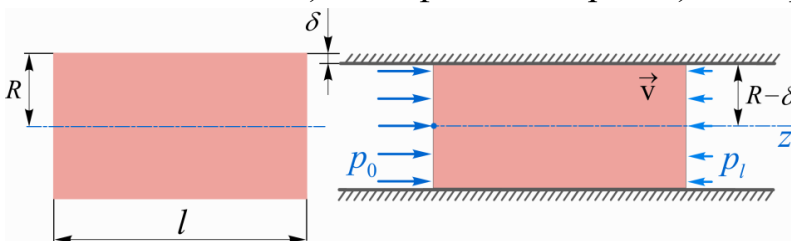


Рисунок 6 – Схема руху поршня, запасованого в трубопровід із рівномірним натягом

$$\sigma_{eq}(R, z) = \frac{E}{1-\nu} \frac{\delta}{R} \sqrt{\left(\frac{(1-2\nu)e^{\lambda(l-z)} - (1-\nu)}{\nu} \right)^2 + 3f^2 e^{2\lambda(l-z)}}; \quad p_0 = \frac{E}{\nu} \frac{\delta}{R} (e^{\lambda l} - 1). \quad (16)$$

Результати розрахунків еквівалентних напружень та запоршневого тиску подано на рис. 7–9.

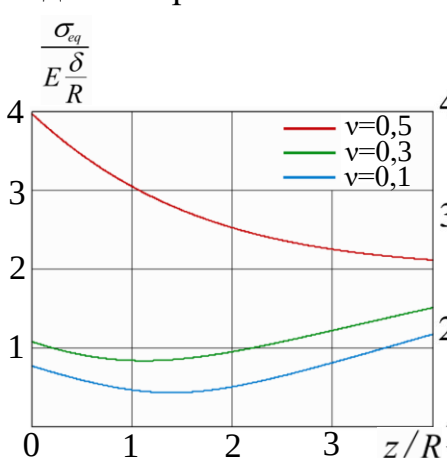


Рисунок 7 – Розподіл еквівалентних напружень Мізеса на бічній поверхні поршня

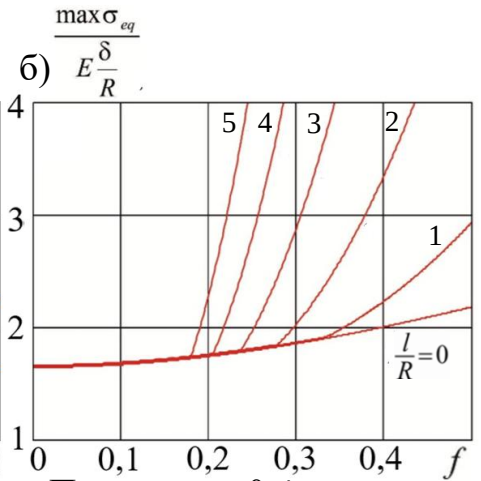
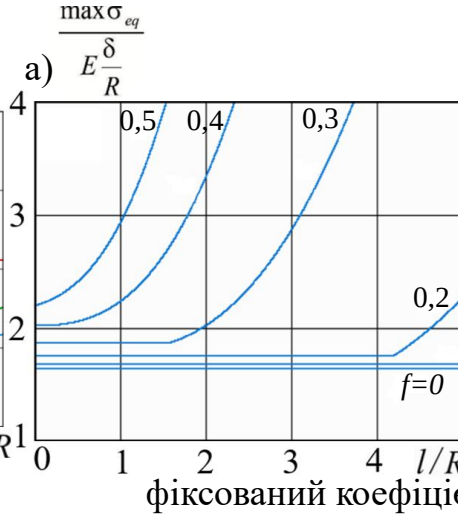


Рисунок 8 – Залежність максимальних еквівалентних напружень від: а) – довжини поршня; б) – коефіцієнта тертя

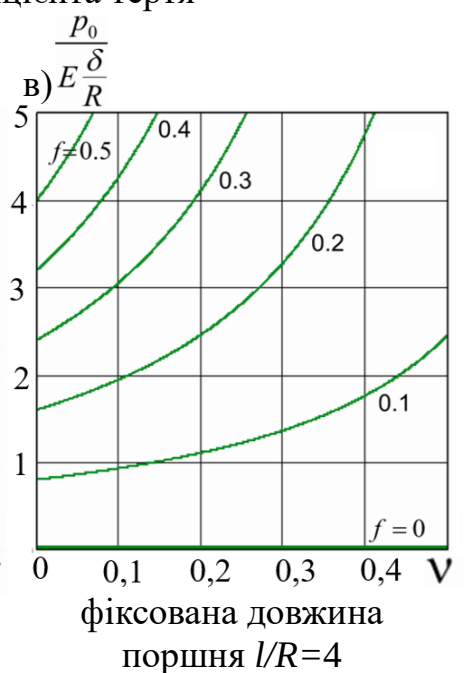
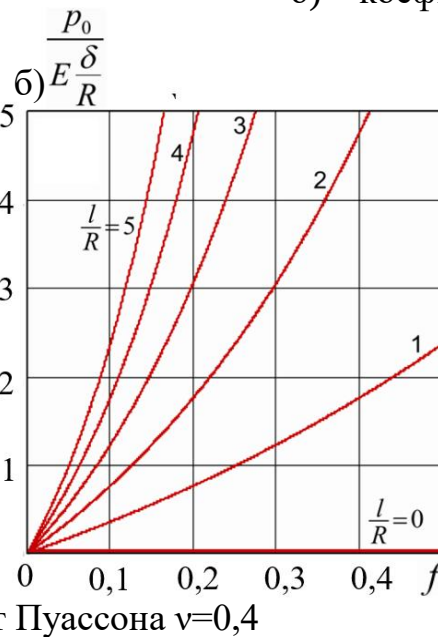
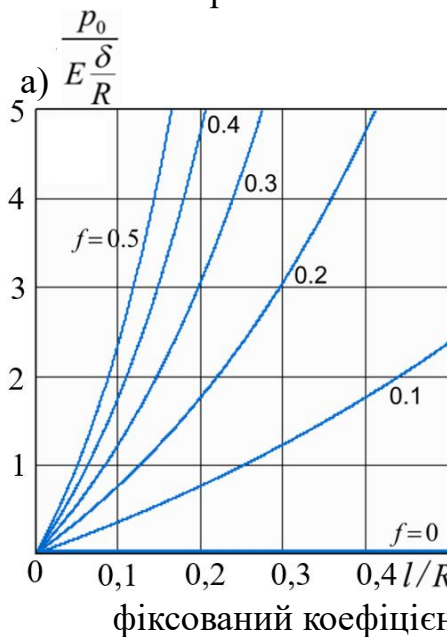


Рисунок 9 – Залежність запоршневого тиску від: а) – довжини поршня; б) – коефіцієнта тертя; в) – коефіцієнта Пуассона

Однією із перешкод руху поршня трубопроводами систем збирання та транспортування газу газових родовищ, газових і теплових мереж є напливи в місці зварних швів у порожнину трубопроводу. Профіль такого напливу (рис. 10) у перерізі $\theta = \text{const}$ змодельовано параболою з підшвою завширшки a та стрілою підйому $\delta_{\max}$. Для такого випадку у загальні квадратури для $\sigma_z(z)$ та p_0 натяг підставлено у вигляді квадратичної параболі

$$\delta(z) = \delta_0(z-l+s), \quad \delta'(z) = \delta'_0(z-l+s); \quad (17)$$

$$\delta_0(Z) = 4 \frac{\delta_{\max}}{a} Z \frac{a-Z}{a} H(Z) H(a-Z), \quad \delta'_0(Z) = 4 \frac{\delta_{\max}}{a} \frac{a-2Z}{a} H(Z) H(a-Z), \quad (18)$$

де $H(Z) = \begin{cases} 1, & Z > 0 \\ 0, & Z < 0 \end{cases}$ – одинична функція Гевісайда.

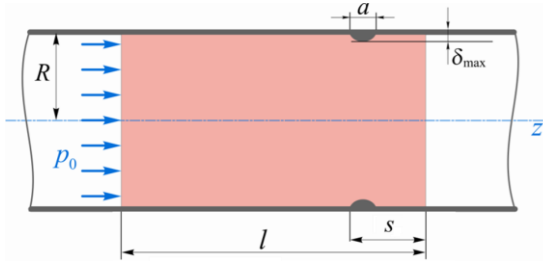


Рисунок 10 – Схема взаємодії рухомого поршня із напливом у порожнину трубопроводу в місці зварного шва

Встановлено закономірності розподілу осьових (рис. 11) та еквівалентних (рис. 12) напружень у поршні під час його взаємодії із зварним швом, зміни максимального еквівалентного напруження у поршні (рис. 13) та запоршневого тиску (рис. 14) під час його руху трубопроводом у місці напливу зварного з'єднання.

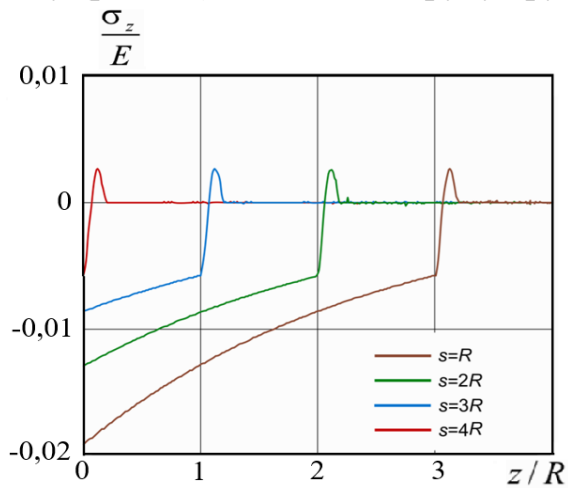


Рисунок 11 – Розподіл осьових напружень у поршні під час його взаємодії із зварним швом

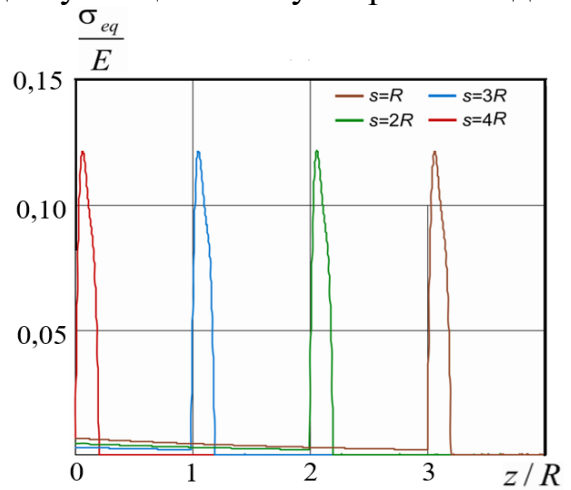


Рисунок 12 – Розподіл еквівалентних напружень у поршні під час його взаємодії із зварним швом

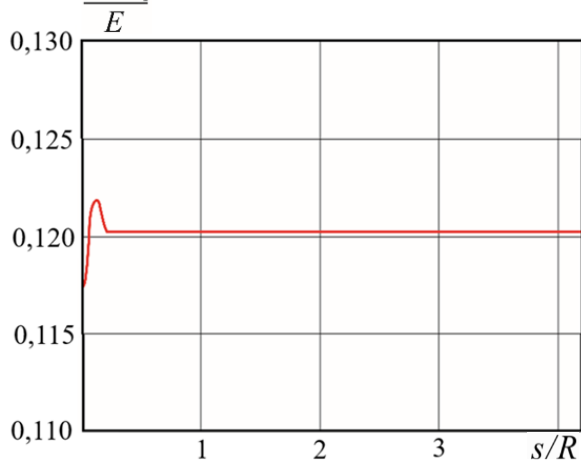


Рисунок 13 – Зміна максимального еквівалентного напруження у поршні під час його руху трубопроводом у місці зварного шва

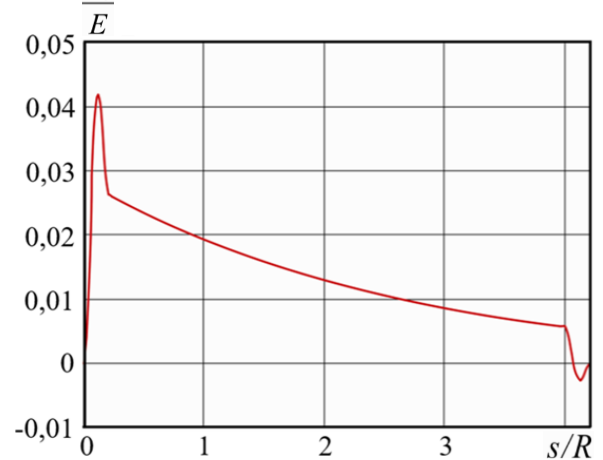
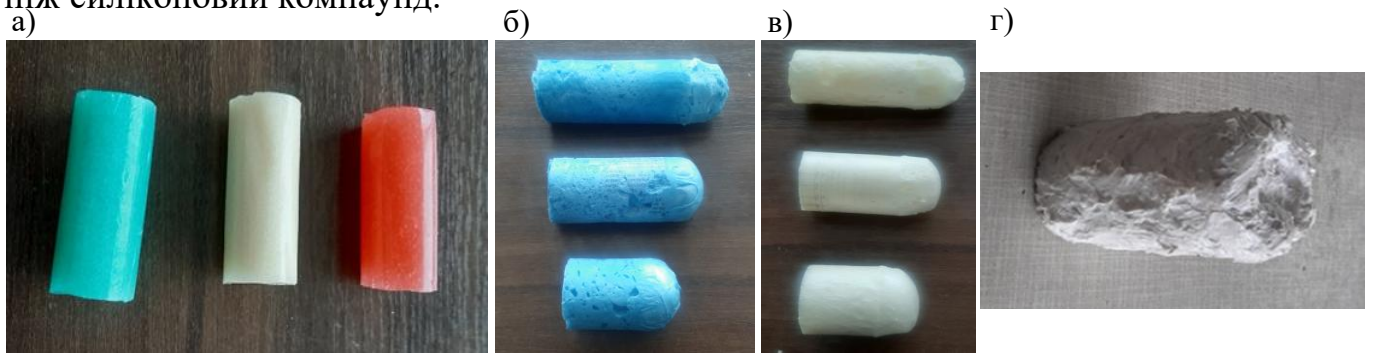


Рисунок 14 – Зміна запоршневого тиску під час руху поршня трубопроводом у місці зварного шва

За результатами моделювань для покращення прохідності поршня трубопроводом розроблено ряд рекомендацій, зокрема, збільшувати стисливість та гнучкість поршня, використовуючи пористі матеріали з малими модулем Юнга та коефіцієнтом Пуассона або ж розробити нові конструкції поршнів складної геометричної форми, яка забезпечує малі ефективні пружні константи, зменшувати коефіцієнт тертя, уникаючи сухих режимів проковзування.

У **третьому розділі** *“Експериментальні дослідження процесів очищення горизонтальних і понижених ділянок трубопроводів пружними поршнями”* розроблено технології виготовлення і виготовлено дослідні зразки очисних поршнів різної геометричної форми із різноманітних пружних матеріалів. Експериментально визначено закономірності впливу твердості матеріалу очисного поршня за шкалою Шор А та його геометричної форми на ефективність очищення трубопроводу. Досліджено динаміку руху дослідних зразків очисних поршнів горизонтальними ділянками трубопроводів, місцями незначних виступів у його порожнину. Запропоновано рекомендації щодо очищення трубопроводів суцільнолитими поршнями з пружних матеріалів.

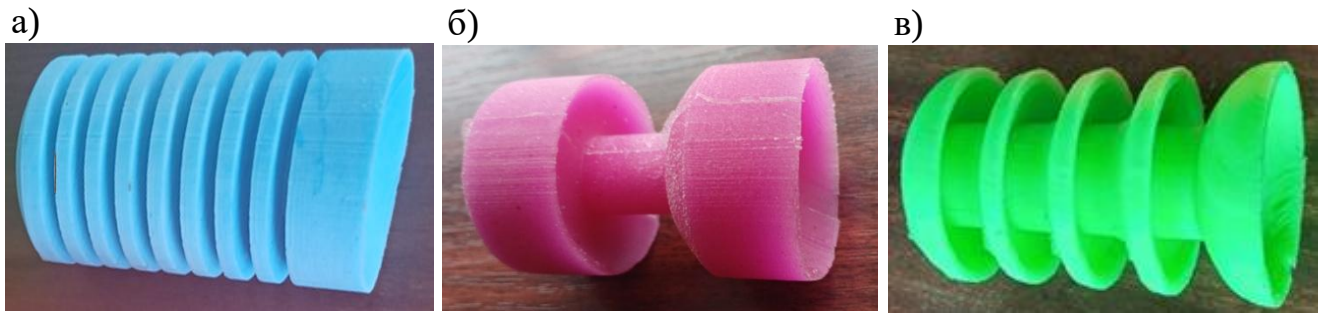
Для експериментальних досліджень розроблено технології виготовлення і виготовлено дослідні зразки циліндричних очисних поршнів різної геометричної форми із різних пружних матеріалів. Це пружно-полімерна композиція (рис. 15, а), яка здатна розчинятись (рецептура Українського науково-дослідного інституту природних газів), пінополіуретан малої густини (рис. 15, б), який є надзвичайно гнучким і еластичним, і пінополіуретан великої густини (рис. 15, в), який є жорстким, та силіконовий герметик (рис. 15, г), який є гнучким і еластичним. Також виготовлено поршні різних геометричних форм із силіконового компаунда (рис. 16) з твердістю від 5 до 30 одиниць за шкалою Шор А, який є міцним і надзвичайно гнучким, еластичними, зносостійким та довговічним, та із поліуретану (рис. 17) з твердістю від 40 до 80 одиниць за шкалою Шор А, який є жорсткішим і міцнішим, ніж силіконовий компаунд.



а) – із пружно-полімерної композиції; б) – із пінополіуретану малої густини;
в) – із пінополіуретану великої густини; г) – із силіконового компаунда

Рисунок 15 – Дослідні зразки циліндричних очисних поршнів

Особливістю розробленої технології виготовлення очисних поршнів із силіконового компаунда та поліуретану є застосування 3D моделювання для розроблення геометричних форм поршнів та ливарних форм і 3D друку для виготовлення ливарних форм.



а) – багатодисковий; б) – циліндрично-дводисковий; в) – манжетно-чашковий
Рисунок 16 – Дослідні зразки очисних поршнів із силіконового компаунда

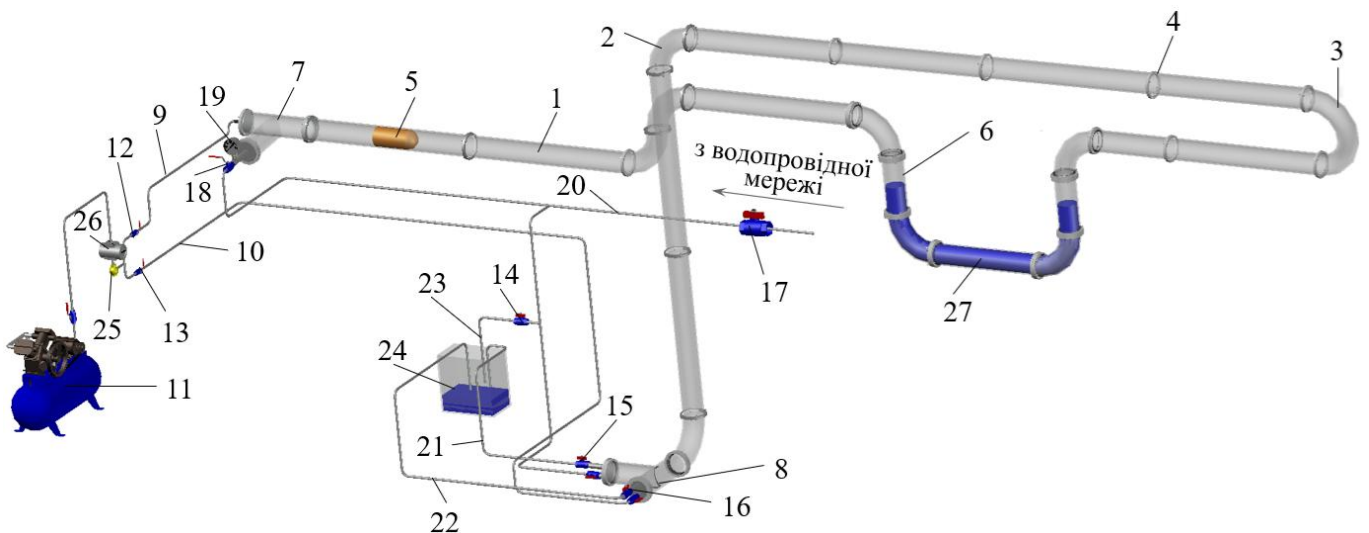


а) – циліндрично-дводисковий; б) – багатодисковий; в) – гантельно трикулевий
Рисунок 17 – Дослідні зразки очисних поршнів із поліуретану

Матеріали, з яких виготовлено дослідні зразки поршнів, чинять вплив на динаміку їх руху трубопроводами, ефективність очищення та прохідну здатність поршня. До того ж суттєвий вплив має геометрична форма поршня. Щоб це дослідити, розроблено та змонтовано експериментальні установки із скляних труб. Перевагою таких установок є можливість спостерігати за динамікою руху поршня, наглядно бачити залишки рідинних забруднень, визначити їх об'єм. Змонтовано експериментальну установку із двома пониженими ділянками, в які перед запусканням поршня заливали воду, а після очистки визначали залишок води. Також для досліджень використано установку із скляних труб з протяжними горизонтальними ділянками трубопроводу, загальною довжиною більше 100 м (рис. 18). У такій установці з застосуванням надрукованих на 3D принтері фланців змонтовано понижену П-подібну ділянку в яку до запускання поршня заливали воду. Установку обладнано вузлами запускання та приймання поршнів. Розроблено і змонтовано обв'язку, вузол переключення, які забезпечують можливість закачувати воду в понижену ділянку, рухати поршень в аверсному і реверсному напрямку.

Експериментально визначено закономірності впливу твердості матеріалу очисного поршня за шкалою Шор А та його геометричної форми на ефективність очищення трубопроводу (рис. 20). Чим більша жорсткість поршня за рахунок твердості матеріалу та геометричної форми, тим менший був залишок води в трубопроводі після проходження поршня, і відповідно більша ефективність очищення.

Експериментально виявлено, що через усі дослідні зразки поршнів із гіперпружних матеріалів відбувається перетікання повітря з запоршневого простору. За загинанням ущільнювальних елементів встановлено, що перетікання повітря через поршень відбувається у верхній частині труби, а рідини – в нижній. При цьому



9, 10 – лінія подавання повітря; 11 – компресор; 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18 – кран;
19 – манометр; 20 – лінія подавання води; 21, 22, 23 – лінія відведення води з
передпоршневого простору; 24 – скляна мірна ємність; 25 – запобіжний клапан;
26 – газовий лічильник; 27 – вода

Рисунок 18 – Схема експериментальної установки для дослідження ефективності очищення горизонтальних ділянок трубопроводів поршнями

б)

а)



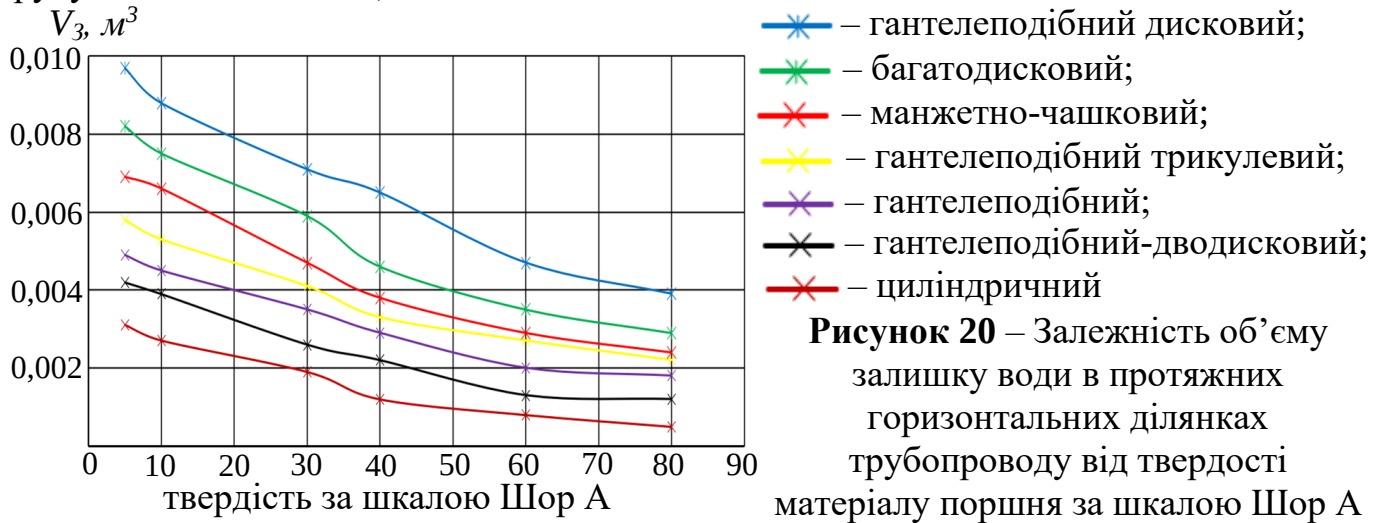
а) – горизонтальна прямолінійна ділянка; б) – понижена ділянка

Рисунок 19 – Очищення трубопроводу дослідними зразками поршнів

чим більша жорсткість поршня за рахунок твердості матеріалу та геометричної форми, тим краще він утримує форму, що забезпечує щільніше та рівномірне прилягання до внутрішніх стінок трубопроводу і сприяє зменшенню перетікань та максимально ефективному очищенню.

Встановлено, що у місцях значних виступів гумових ущільнень у порожнину трубопроводу (у дослідженні їх було два), відбуваються тимчасові зупинки руху очисних поршнів і різке прискорення після зрушення, що призводить до посилення перетікань через поршень і зниження ефективності очищення. Прохідність поршня через подібні перешкоди визначається його геометричною формою, твердістю матеріалу та швидкістю руху. Найкраще проходять такі перешкоди манжетно-чашкові та багатодискові поршні із силіконового компаунда, циліндричні з пінополіуретану малої густини. Така проблема є поширеною для шлейфів свердловин, трубопроводів газових і теплових мереж. Встановлено, що для

ефективного очищення трубопроводів, які містять велику кількість таких перешкод, важливо не тільки підібрати оптимальний поршень, а і забезпечити швидкість його руху якомога більшою, але не більше 5 м/с.



У четвертому розділі “Дослідження руху пружних поршнів відводами трубопроводів” розроблено механіко-математичну модель руху пружного поршня відводом трубопроводу. На основі аналітичного розв’язку задачі контакту пружного поршня з відводом, чисельним моделювання та експериментально досліджено вплив місцезнаходження поршня у відводі, пружних модулів матеріалу, тертя та геометричних параметрів поршня на розподіл поперечного контактного навантаження вздовж поршня, напружено-деформований стан поршня та величину необхідного запоршневого тиску для проходження поршнем відводів трубопроводів. Отримано рівняння для визначення мінімально допустимої швидкості руху циліндричного поршня із пружного матеріалу на вході у відвід трубопроводу, щоб він його пройшов без зупинки і застрягання.

Одними з перешкод руху поршня трубопроводами систем збирання та транспортування газу газових родовищ, газових і теплових мереж є різні фасонні елементи, зокрема відводи. Щоб дослідити їх вплив, аналітично оцінити основні ефекти, розглянуто задачу руху пружного циліндричного поршня відводом трубопроводу сталого круглого поперечного перерізу. Невелике відхилення осі труби від прямої лінії характеризуються функцією $Y_0(Z) \ll R$ (рис. 21).

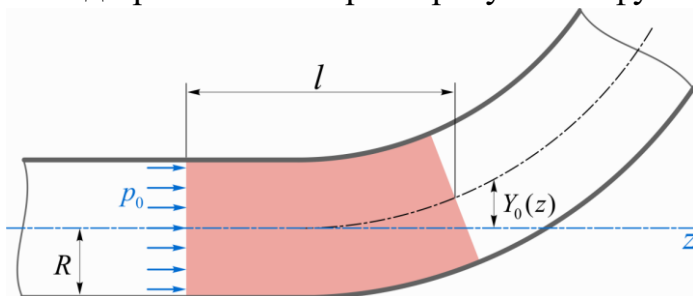


Рисунок 21 – Схема руху пружного циліндричного поршня відводом трубопроводу

Під дією запоршневого тиску p_0 пружний поршень рухається трубопроводом і долає дотичні сили опору, спричинені проковзуванням на бічній поверхні.

Дослідження виконано у квазістатичній постановці, нехтуючи силами інерції. Деформації поршня вважаються малими, а стінка труби – абсолютно жорсткою. Для

отримання аналітичної оцінки основних ефектів побудували одновимірну інженерну модель пружного поршня, яка включає:

– усереднені рівняння рівноваги

$$\sum Z_i = A \frac{d\sigma_z}{dz} + \int_{\Pi} \tau_{nz} d\Pi = 0, \quad z \in (0, l), \quad \sigma_z(l) = 0; \quad (19)$$

$$\sum Y_i = \int_0^l \int_{\Pi} \sigma_n \cos(n, y) d\Pi dz = 0, \quad \sum m_i = \int_0^l \int_{\Pi} \sigma_n \cos(n, y) d\Pi z dz = 0; \quad (20)$$

– кінематичне припущення

$$u_y^0 = \Delta + \Theta z; \quad (21)$$

– усереднений закон Гука, який враховує поперечне обтіснення

$$\sigma = \sigma^+ - \sigma^- = k \frac{E}{R} (Y_0(z) - (\Delta + \Theta z)), \quad (22)$$

$\sigma^\pm = \frac{1}{\Pi^\pm} \int_{\Pi^\pm} \sigma_n d\Pi$ – середні контактні напруження на верхньому та нижньому

півпериметрах;

– умови фрикційного контакту на бічній поверхні

$$u_y - Y_0(z) = 0, \quad \tau_{nz} = (f - Y_0'(z) \cos(n, y)) \sigma_n, \quad \sigma_n < 0; \\ \sigma_n = 0, \quad \tau_{nz} = 0, \quad u_y - Y_0(z) < 0. \quad (23)$$

Поверхневі інтеграли виражено через поперечне навантаження

$$\int_{\Pi} \sigma_n d\Pi = -k_1 \Pi |\sigma|, \quad \int_{\Pi} \sigma_n \cos(n, y) d\Pi = k_2 \Pi \sigma, \quad (24)$$

де k_i – коефіцієнти форми перерізу.

Тоді ключові рівняння (19)–(23) записано у формі

$$\frac{d\sigma_z}{dz} = \frac{\Pi}{A} (fk_1 |\sigma| + Y_0'(z) k_2 \sigma), \quad z \in (0, l), \quad \sigma_z(l) = 0, \quad (25)$$

$$\int_0^l \sigma dz = 0, \quad \int_0^l \sigma z dz = 0, \quad (26)$$

$$\sigma = k \frac{E}{R} (Y_0(z) - (\Delta + \Theta z)). \quad (27)$$

Підстановкою виразу (27) у рівняння (26) отримали систему лінійних алгебраїчних рівнянь для невідомих сталих

$$\Delta l + \Theta \frac{l^2}{2} = \int_0^l Y_0(z) dz, \quad \Delta \frac{l^2}{2} + \Theta \frac{l^3}{3} = \int_0^l Y_0(z) z dz. \quad (28)$$

Після інтегрування диференціального рівняння (25) знайдено величину запоршневого тиску

$$p_0 = -\sigma_z(0) = \frac{\Pi}{A} \left(fk_1 \int_0^l |\sigma| dz + k_2 \int_0^l Y_0'(z) \sigma dz \right). \quad (29)$$

У формулі (29) перший доданок – фрикційна складова (від тертя), другий доданок – деформаційна складова (від кута атаки).

За результатами аналітичного розв'язку контактної задачі встановлено закономірності розподілу поперечного контактного навантаження вздовж поршня (рис. 22) та зміни величини запоршневого тиску (рис. 23) під час заходу поршня у відвід трубопроводу.

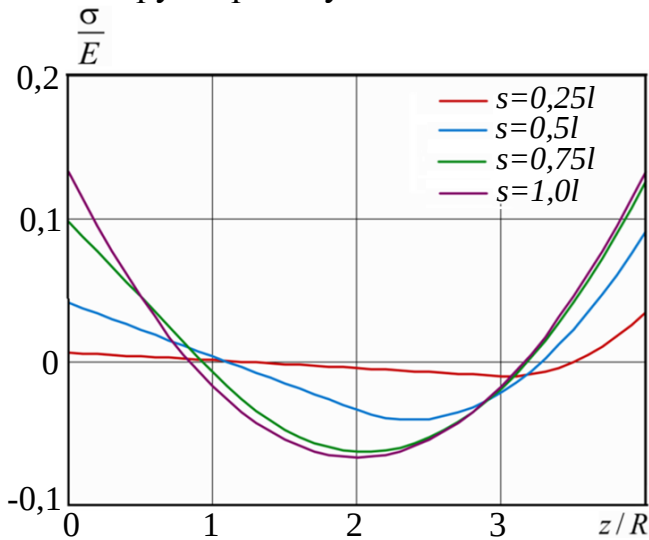


Рисунок 22 – Розподіл поперечного контактного навантаження вздовж поршня під час його руху відводом трубопроводу

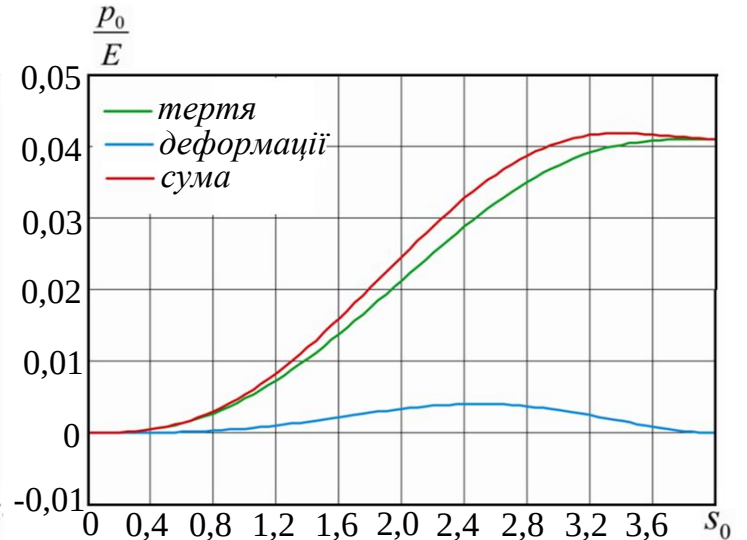


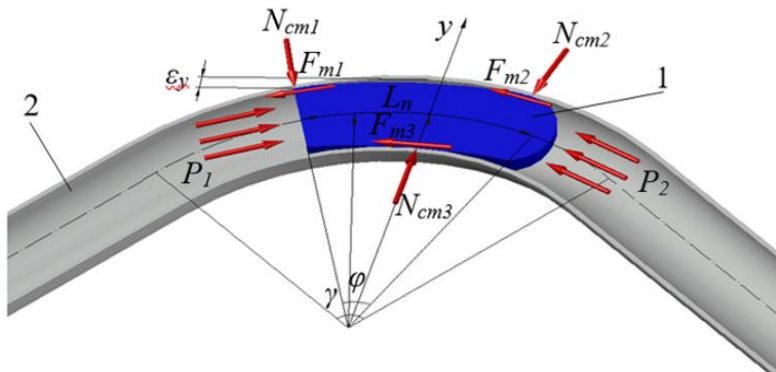
Рисунок 23 – Зміна величини запоршневого тиску під час руху поршня відводом трубопроводу

Аналітичним методом встановлено, що вигинання циліндричних суцільнолитих поршнів із пружних матеріалів у відводах трубопроводів призводить до суттєвого збільшення контактних сил нормальної реакції стінки, і відповідно сил тертя. При цьому сили тертя суттєво залежить від модуля пружності матеріалу поршня. Для поршнів виготовлених із твердих пружних матеріалів він є досить великий, а відповідно і великі сили тертя, що може призвести до швидкого уповільнення поршня у відводі, аж до зупинки. У разі значного перетікання через поршень транспортованого середовища або недостатнього тиску у запоршневому просторі він застрягне.

Тому на основі аналізу сил, які діють на поршень у тангенціальному напрямку, під час його руху відводом трубопроводу (рис. 24), та другого закону Ньютона записано рівняння руху поршня

$$(P_1 - P_2)S_n - F_{T1} - F_{T2} - F_{T3} = m_n a_m, \quad (30)$$

де a_m – тангенціальне прискорення поршня у відводі.



1 – поршень; 2 – відвід
Рисунок 24 – Розрахункова схема руху циліндричного поршня із пружного матеріалу відводом трубопроводу

Щоб визначити сили тертя F_{T1} , F_{T2} та F_{T3} , які діють на циліндричний поршень із пружного матеріалу під час його руху відводом трубопроводу, визначено відповідні їм контактні сили нормальної реакції N_{cm1} , N_{cm2} та N_{cm3} .

Сили тертя підставлено у рівняння руху поршня (30) і визначено тангенціальне прискорення поршня у відводі

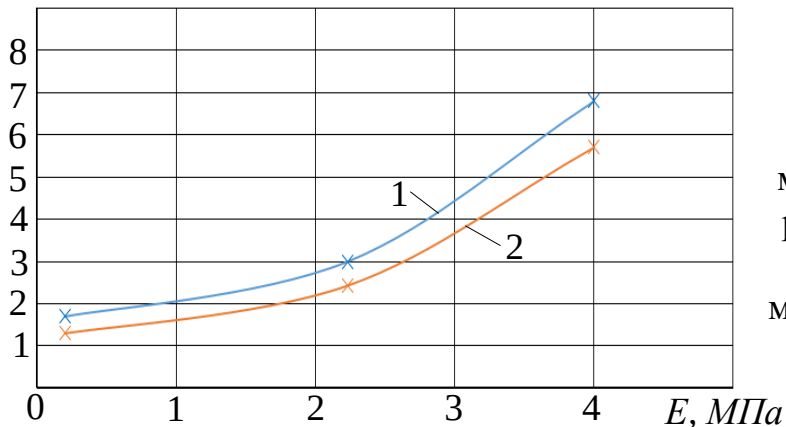
$$a_m = \frac{\pi D_n^2 (P_1 - P_2)}{4m_n} - f \left(\frac{\pi D_n^4 E}{16m_n R L_n} \left(1 + \cos \frac{L_n}{2R} \right) - \frac{V^2}{R} \right). \quad (31)$$

Тоді кінцеву швидкість руху поршня прирівняно до нуля і визначено віддаль, яку пройде поршень до повної зупинки, що дало змогу знайти мінімально допустиму швидкість руху поршня на вході у відвід трубопроводу

$$V_{n \min} = \sqrt{\frac{2f\gamma R}{1+2f\gamma} \left(\frac{\pi D_n^4 E}{16m_n R L_n} \left(1 + \cos \frac{L_n}{2R} \right) - g \right)}. \quad (32)$$

За рівнянням (32) та експериментально визначено мінімально допустиму швидкість руху циліндричних дослідних зразків поршнів на вході у відвід трубопроводу і побудовано її залежність від модуля пружності матеріалу з якого він виготовлений (рис. 25). Така швидкість суттєво збільшується зі збільшенням модуля пружності матеріалу поршня. Якщо модуль пружності матеріалу поршня збільшити від 0,2 МПа до 4 МПа, то мінімально допустима швидкість руху поршнів на вході у відвід збільшиться у 4 рази – від 1,7 м/с до 6,8 м/с (розрахунок виконано для відводу трубопроводу внутрішнім діаметром 54 мм, радіусом вигину 80 мм і кутом вигину 90° яким рухаються поршні із досліджуваних матеріалів діаметром 54 мм і довжиною 110 мм). Відхилення експериментальних даних від розрахункових склало до 15 %.

$V_{n \min}$, м/с



1 – результати розрахунків;
2 – експериментальні дані
Рисунок 25 – Залежність мінімально допустимої швидкості руху поршня на вході у відвід від модуля пружності на згин матеріалу з якого він виготовлений

Окрім аналітичного моделювання руху поршня відводами трубопроводів, виконано чисельне моделювання. Таким методом у тривимірній постановці поєднано геометричну нелінійність трубопроводу, фізичну нелінійність властивостей матеріалу поршня та контактну нелінійність. Для чисельного моделювання великих деформації з кулонівським тертям між твердим та гіперпружним тілом застосовано модель Йоо 3-го порядку з відповідними значеннями констант різних гіперпружних матеріалів поршня. Відвід змодельовано крутовигнутим, а поршні різної довжини. Між поверхнями задано контактну модель тертя Кулона з відповідними коефіцієнтами динамічного тертя. Зовнішня поверхня поршня задана як контактна поверхня (contact), а внутрішня стінка відводу і прилеглих прямих ділянок труби – як головна напрямна поверхня (target) (рис. 26).

Задано переміщення заднього торця поршня в напрямку осі трубопроводу (рис. 26). Встановлено закономірності розподілу напружень Мізеса в поршні під час його руху відводом трубопроводу (рис. 27). Так, коли поршень входить у відвід, передня його частина починає зазнавати великих деформацій вигину, що призводить до виникнення максимальних еквівалентних напружень Мізеса в ній. Якщо поршень має великий модуль пружності і є жорстким, то в цьому місці може відбутись його застрягання, що спостерігалось під час експериментальних досліджень.

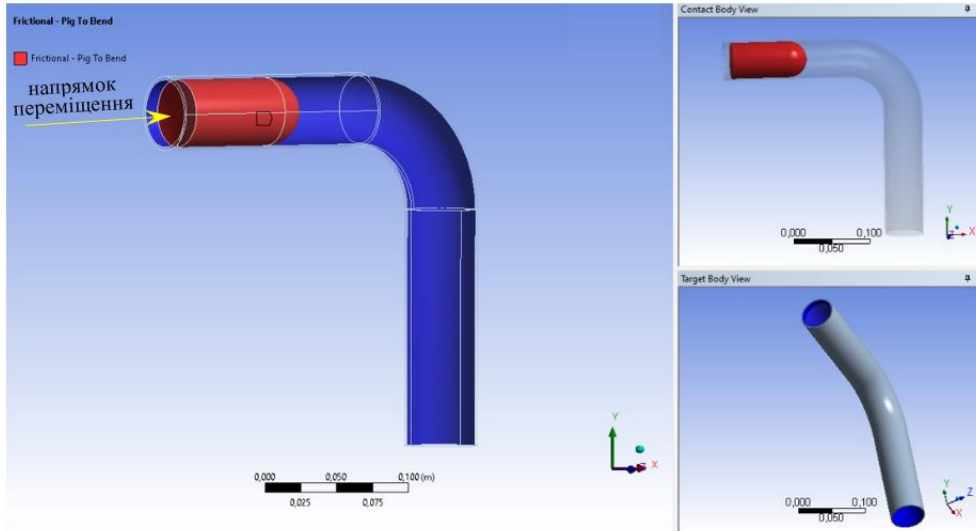


Рисунок 26 – Моделювання контактних поверхонь

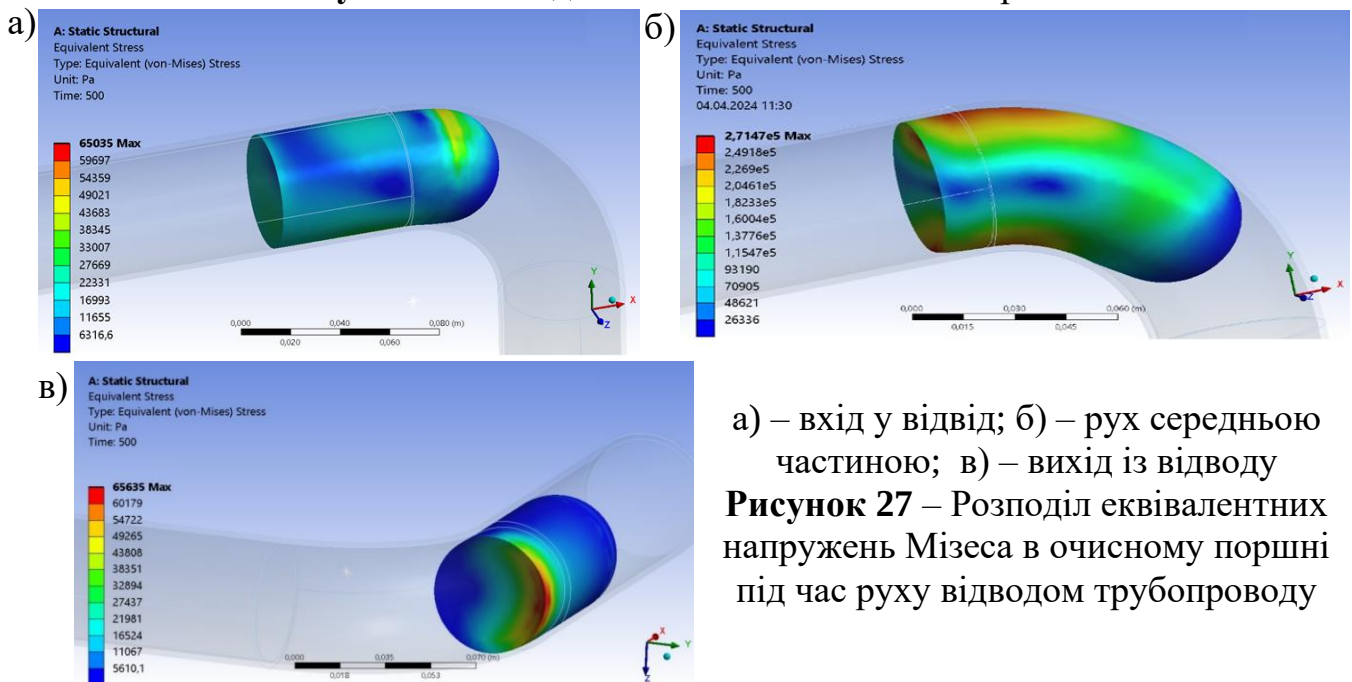
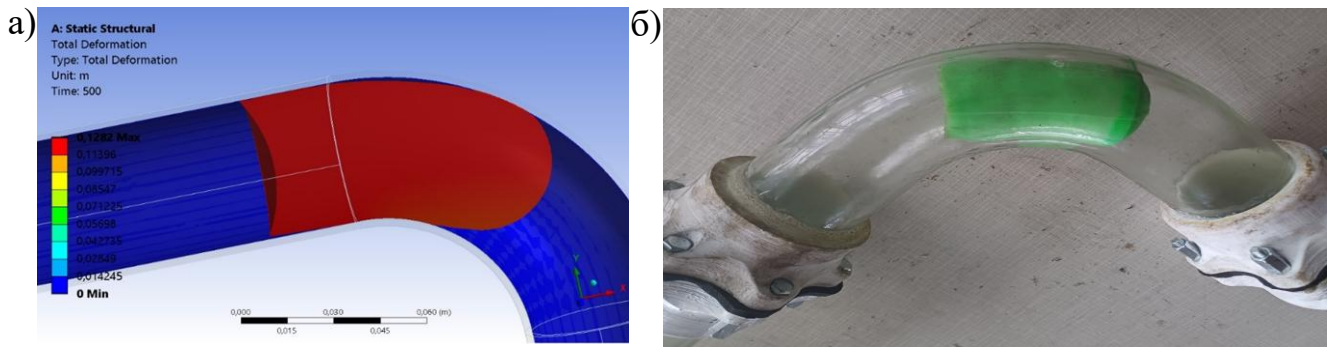


Рисунок 27 – Розподіл еквівалентних напружень Мізеса в очисному поршні під час руху відводом трубопроводу

За результатами візуалізування повних деформацій виявлено, що під час руху очисного циліндричного поршня середньою частиною відводу у результаті вигинання із вгнутого боку відводу поршень відокремлюється від стінки в передній і задній частині, а з опуклого боку – в середній. Таке відокремлення призводить до утворення зазору і перетікань через поршень, зменшення перепаду тиску на ньому, що може призвести до його застрягання. Результати моделювання верифіковано експериментально (рис. 28).

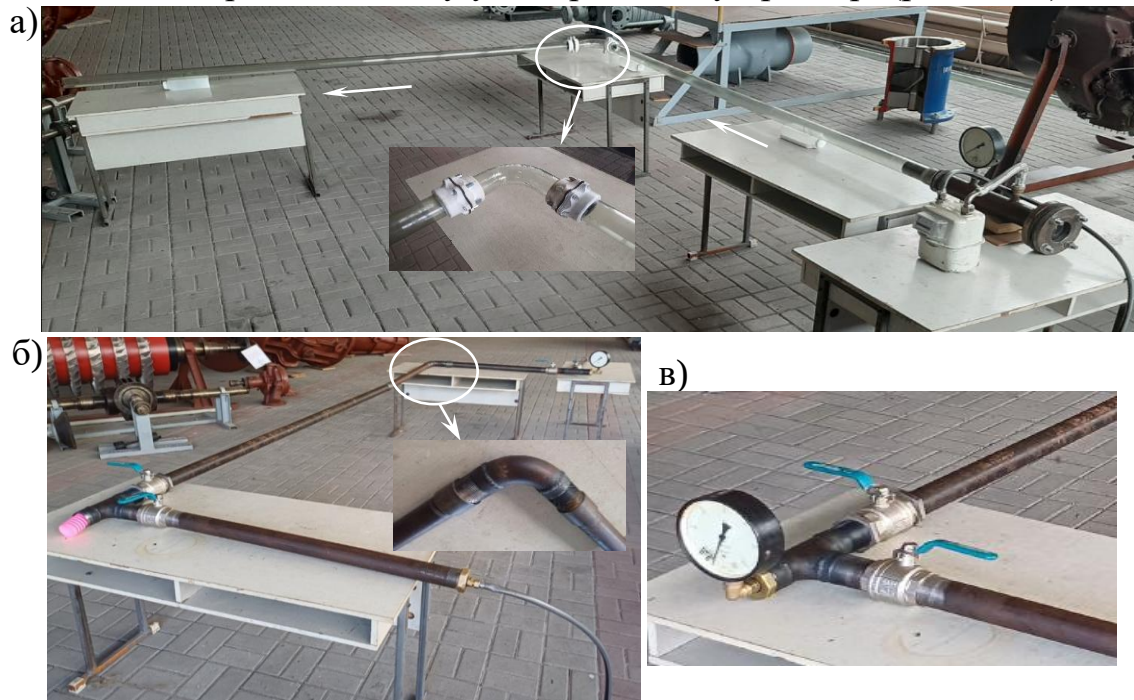


а) – моделювання; б) – експериментальні дослідження

Рисунок 28 – Деформації очисного поршня під час його руху середньою частиною відводу трубопроводу

Такі явища спостерігалися і під час досліджень аналітичним моделюванням (28)–(32).

Фізико-механічні характеристики матеріалів, із яких виготовлено очисні поршні, їх геометрична форма впливають на динаміку руху фасонними елементами трубопроводу і на величину запоршневого тиску. Для досліджень такого впливу розроблено та змонтовано експериментальні установки із скляних (рис. 29, а) і металевих (рис 29, б) труб, які містять крутовигнуті відводи. Перевагою скляних є можливість візуального спостереження за динамікою руху поршня, а металеві призначені для вимірювання тиску у запоршневому просторі (рис. 29, в).



а) – скляна; б) – металева; в) – вузол запускання поршнів

Рисунок 29 – Експериментальні установки для дослідження руху дослідних зразків поршнів відводами трубопроводів

Визначено закономірності впливу твердості матеріалу поршня за шкалою Шор А та його геометричної форми на деформації у відводах, виявлено випадки відокремлення окремих поршнів від стінки, що посилювало перетікання і

призводило до застрягань. Таке явище відбувалось із циліндричними поршнями, а за великих значень коефіцієнтів тертя – манжетно-чашковими (рис. 30, а). Крутовигнуті відводи за невеликого тиску у запоршневому просторі без деформацій добре проходять гантелеподібні поршні (рис. 30, б, в), так як їх центральна частина має менший діаметр від діаметра поршня, що забезпечує велику гнучкість поршня.



а) – манжетно-чашковий; б) – гантелеподібний-дводисковий; в) – гантелеподібний дисковий

Рисунок 30 – Рух очисних поршнів із силіконового компаунда відводом трубопроводу

Встановлено залежності між твердістю матеріалу поршня за шкалою Шор А, його довжиною та величиною необхідного запоршневого тиску для проходження відводів трубопроводу поршнями різної геометричної форми. Із збільшенням твердості матеріалу поршня величина його деформацій у відводах, і відповідно відокремлення від внутрішньої стінки та перетікання зменшуються, однак збільшується величина необхідного запоршневого тиску для проходження фасонних елементів (рис. 31). Так, для того, щоб циліндричні очисні поршні із силіконового компаунда твердістю 30 одиниць за шкалою Шор А проходили відводи трубопроводів із кутом вигину, рівним 90° , і радіусом вигину, рівним $1,5DN$, тиск в запоршневому просторі повинен бути не менше, ніж у два рази більший, ніж тиск, необхідний для руху поршня прямолінійною ділянкою трубопроводу. Результати експериментальних досліджень порівняно з результатами моделювання.

P , МПа

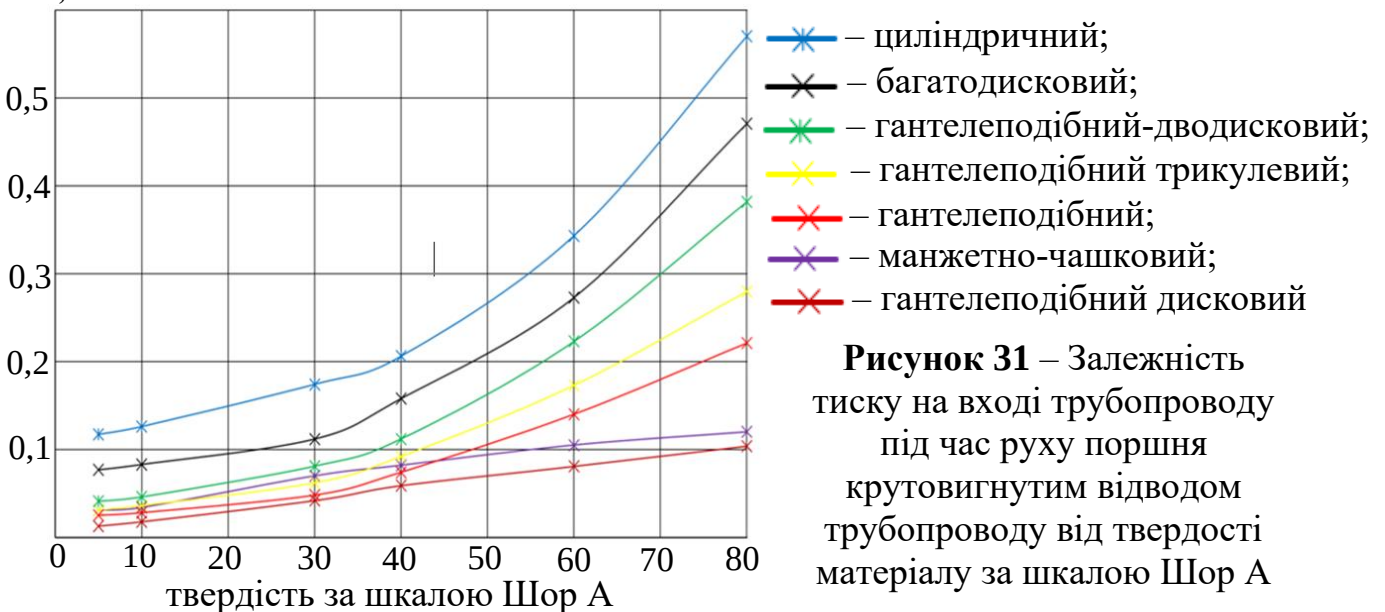


Рисунок 31 – Залежність тиску на вході трубопроводу під час руху поршня крутовигнутим відводом трубопроводу від твердості матеріалу за шкалою Шор А

У п'ятому розділі “Дослідження руху пружних поршнів перехідниками і трійниками трубопроводів” на основі аналітичного розв’язку задачі руху пружного поршня конічним перехідником трубопроводу з більшого на менший діаметр труб досліджено вплив місцезнаходження поршня у перехіднику, тертя, пружних модулів матеріалу на його напружений стан та на величину запоршневого тиску. Експериментально досліджено динаміку руху дослідних зразків очисних поршнів перехідниками і трійниками трубопроводів, виміряно величину необхідного для їх проходження запоршневого тиску.

Перехідники із більшого на менший діаметр труб є суттєвими перешкодами руху поршня трубопроводом. Щоб дослідити їх вплив, аналітично оцінити основні ефекти, розглянуто конічний перехідник довжиною a із трубопроводу внутрішнього радіуса R у трубопровід меншого внутрішнього радіуса $R - \delta_{\max}$ (рис. 32). Прийнято, що $\delta_{\max} / R \ll 1$, а отже кут атаки є малим. Розглянуто випадок, який найчастіше зустрічається на практиці – довжина поршня перевищує довжину конічної ділянки $l > a$.

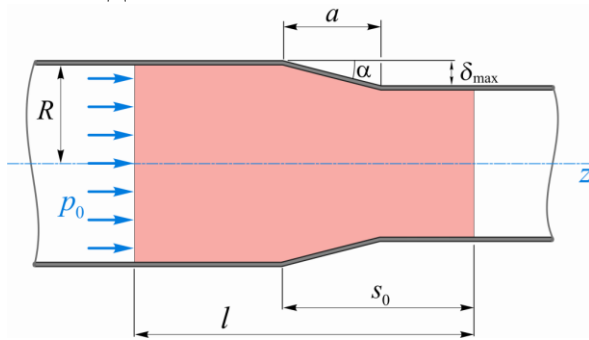


Рисунок 32 – Схема руху поршня конічним перехідником трубопроводу

У такій задачі перешкода складається з двох ділянок: конічне звуження $0 \leq Z \leq a$ та стале зменшення діаметру трубопроводу $Z \geq a$.

Тому у загальні квадратури (9) та (11) відповідно для $\sigma_z(z)$ та p_0 треба підставити кусково-лінійну функцію натягу

$$\delta(z) = \delta_0(z - l + s_0), \quad \delta'(z) = \delta'_0(z - l + s_0), \quad (33)$$

$$\delta_0(Z) = \frac{\delta_{\max}}{a} (ZH(Z) - (Z - a)H(Z - a)), \quad (34)$$

$$\delta'_0(Z) = \frac{\delta_{\max}}{a} (H(Z) - H(Z - a)). \quad (35)$$

За результатами розрахунків для реальних пропорцій перехідника встановлено закономірності зміни максимального еквівалентного напруження у поршні (рис. 33) та величини запоршневого тиску (рис. 34).

Експериментально встановлено, що через перехідники трубопроводів здатні проходити тільки манжетно-чашкові поршні із силіконового компаунда за тиску в запоршневому просторі 0,8–1 МПа.

Фізичні процеси, які відбуваються під час руху поршнів трійниками трубопроводів на сьогодні не вивчені. Вони залежать від великої кількості різноманітних чинників, якими є геометрія трійників, напрямки руху потоку трійником, газодинамічні процеси, зумовлені зміною напрямку потоку, нерівномірне притискання поршня до стінки у різних місцях, що впливає на коефіцієнт тертя тощо. Крім того, суттєвий вплив чинять фізико-механічні властивості матеріалу

поршня та його геометричні параметри і форма. Відсутність інформації про закономірності руху поршнів трійниками ускладнює планування, аналіз, визначення маршруту руху поршнів, створює велику кількість невизначеностей, унеможливорює достовірне оцінювання придатності трубопроводів, які мають такі фасонні елементи, до застосування поршнів. Тому виконані ґрунтовні дослідження динаміки руху дослідних зразків поршнів трійниками, які дають змогу впевненіше використовувати поршні на практиці, планувати їх маршрути руху. Найкращим підходом до вирішення таких задач є експериментальні дослідження. Для цього розроблено та змонтовано експериментальні установки із скляних (рис. 35, а) і металевих труб (рис. 35, б), які містять трійники.

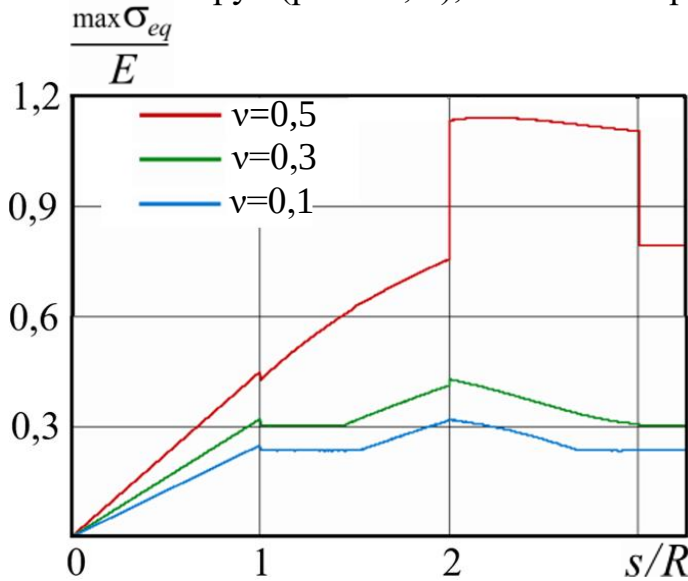


Рисунок 33 – Зміна максимального еквівалентного напруження у поршні під час його руху перехідником

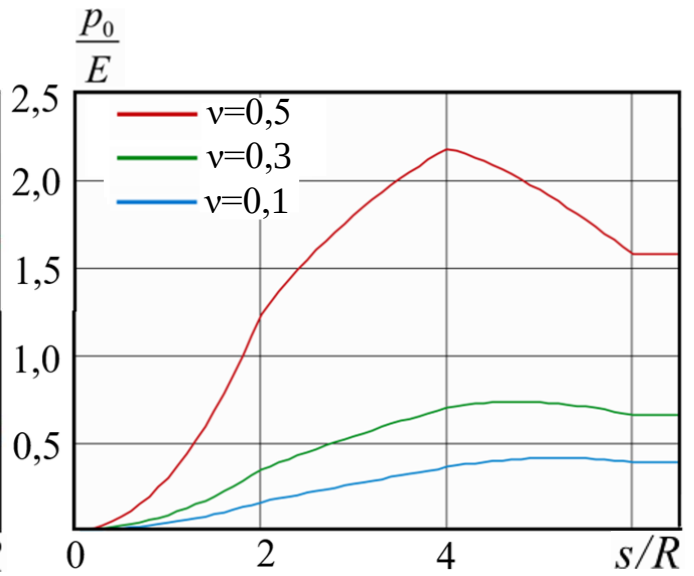


Рисунок 34 – Зміна запоршневого тиску під час руху поршня перехідником



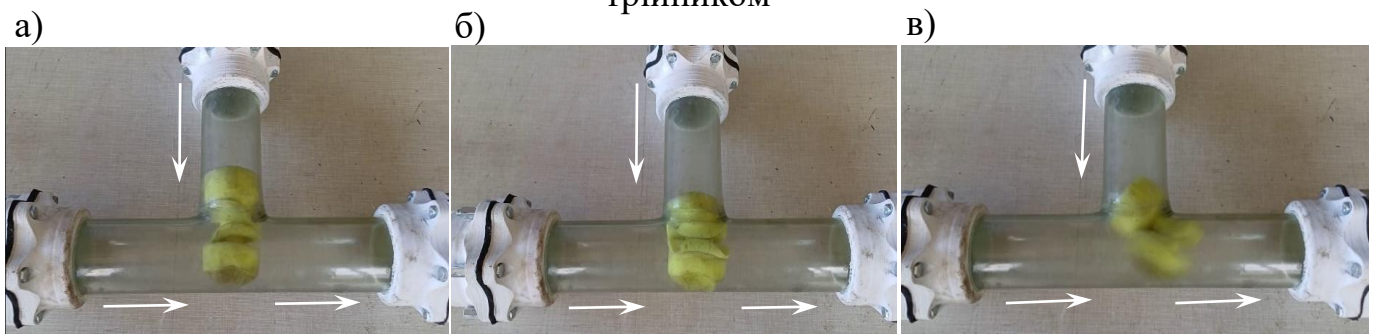
а) – скляна; б) – металева

Рисунок 35 – Експериментальні установки для дослідження руху дослідних зразків поршнів трійниками трубопроводів

Встановлено, що у трійниках відбуваються суттєві стискання, викривлення поршнів (рис. 36, рис. 37). Завдяки цьому через трійники, у яких потік рухається із відгалуження в магістраль, здатні проходити усі поршні із пружних матеріалів.



Рисунок 36– Рух манжетно-чашкового поршня із силіконового компаунда трійником



а) – вхід поршня у магістраль трійника; б) – повздовжнє стискання поршня у магістралі трійника; в) – вигинання поршня у магістралі трійника

Рисунок 37 – Рух циліндрично-двотискового поршня із силіконового компаунда трійником

Однак, за напрямку руху потоку і поршня із магістралі у відгалуження трійника усі поршні, крім циліндричних, застрягають.

Циліндричні поршні у трійниках рухаються за напрямком потоку у їх порожнині, за винятком найжорсткіших із поліуретану, які застрягають.

У трійниках жорсткі циліндричні поршні із пінополіуретану великої густини руйнувались, а у поршнях із пружно-полімерної композиції, силіконового герметика і пінополіуретану малої густини під час руху трійниками виникали поперечні тріщини. Поршні із поліуретану усіх геометричних форм у трійнику застрягають через їх жорсткість і виникнення перетікання через зазор внаслідок вигинання.

Для вимірювання тиску у запоршневому просторі під час руху поршнів трійником трубопроводу виконано серію експериментальних запусків дослідних зразків поршнів із силіконового компаунда твердістю 30 одиниць за шкалою Шор А у трубопровід змонтований із металевих прямих труб і рівнопрохідного трійника (рис. 36). Кожний дослідний зразок очисного поршня запускали тричі і визначали середнє значення тиску на вході трубопроводу, яке подано в табл. 1.

Найменший тиск у запоршневому просторі, щоб поршень пройшов трійник, потрібний для манжетно-чашкового поршня із силіконового компаунда. Причиною цього є те, що під дією запоршневого тиску його осердя легко вигинається у трійнику, а гнучкі ущільнювальні елементи (манжети та чашки) не чинять цьому суттєвого опору (рис. 37). Натомість найбільший тиск у запоршневому просторі

потрібний для руху циліндричного поршня із силіконового компаунда трійником (табл. 1). Такі поршні мають геометричну форму найбільшої жорсткості, що чинить значний опір їх вигинанню у трійнику.

Таблиця 1 – Результати вимірювання тиску у запоршневому просторі під час руху дослідних зразків очисних поршнів із силіконового компаунда трійником трубопроводу

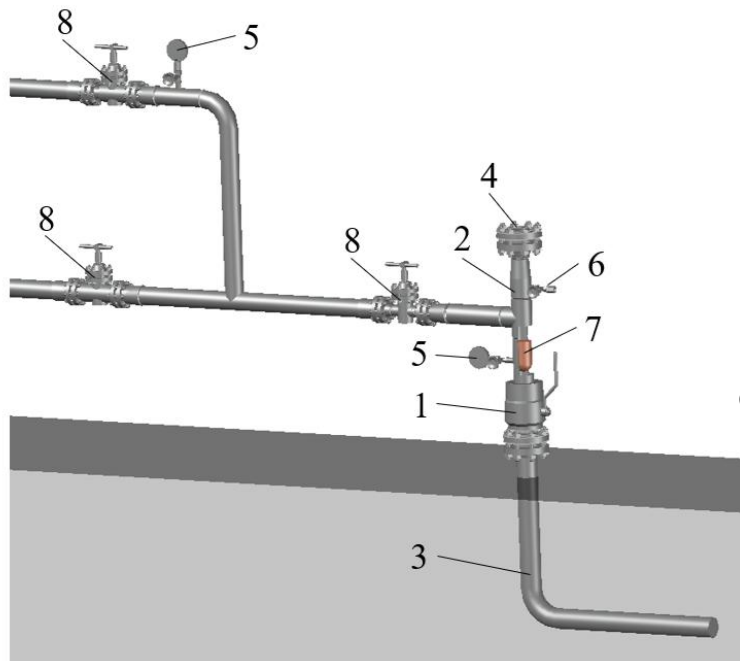
№	Геометрична форма поршня	Тиск на вході, МПа	
		потік входить у відгалуження трійника та в одну з сторін його магістралі, а поршень входить у відгалуження трійника	потік і поршень входять у відгалуження трійника і виходять в одну з сторін його магістралі
1	Циліндричний	0,350	0,424
2	Гантелеподібний-дводисковий	0,193	0,228
3	Гантелеподібний	0,097	0,127
4	Гантелеподібний трикулевий	0,124	0,170
5	Манжетно-чашковий	0,046	0,055
6	Багатодисковий	0,238	0,289
7	Гантелеподібний дисковий	0,063	0,078

У шостому розділі “Розроблення конструкцій вузлів запускання та приймання очисних поршнів” запропоновано монтувати вузли запускання та приймання очисних поршнів в місці відводу трубопроводів, де надземна схема їх прокладання переходить у підземну. Щоб це реалізувати та запобігти при цьому випорожненню трубопроводу під час запускання та приймання поршнів, розроблено відповідні конструктивні рішення. Для запускання очисних поршнів без короткочасного припинення експлуатації газопроводу розроблено конструкцію вузла під’єднання до трубопроводу мобільної камери запускання. Розроблено конструкцію вузла приймання очисних поршнів, який можна монтувати в місці прямолінійних надземних ділянок надземного трубопроводу.

Системи збирання та транспортування газу газових родовищ, газових і теплових мереж спроектовані і побудовані без передбачення їх очищення поршнями, вони не містять вузлів запускання і приймання. Також на основі аналізу обв’язок усть свердловин, входних трубопроводів установок комплексної підготовки газу, встановлено, що такі трубопровідні системи характеризуються великою кількістю ускладнень, зокрема: різноманітність технологічних схем, містять велику кількість нерівнопрохідної арматури встановленої в різних місцях, доволі часто в місцях, де треба влаштувати вузли запускання, приймання поршнів, недостатньо місця, практично кожний трубопровід є унікальним. Тому до кожного трубопроводу

таких трубопровідних систем потрібен індивідуальний підхід, розроблення оригінальних конструктивних рішень.

Розроблено стаціонарний вузол запускання поршнів, який треба монтувати в місці відводу, де надземна схема прокладання трубопроводу переходить у підземну. Це необхідно робити там, де шлейф свердловини виходить із площадки фонтанної арматури, де трубопровід виходить із іншого об'єкту і переходить у підземну схему прокладання. Камеру запропоновано виконати у формі трійника, один кінець магістралі якого заглушено, а до другого приєднано рівнопрохідний кран, через який здійснюється запускання поршня в трубопровід. Щоб запустити очисний поршень його треба запасувати в трійник таким чином, щоб його задній торець був за відгалуженням (рис. 38). Даною розробкою обладнано експериментальні установки (рис. 39) і виконано апробацію, яка засвідчила, що стаціонарний вузол запускання поршнів легко монтувати та використовувати за рахунок конструктивної простоти та технологічності.



1 – кран сферичний рівнопрохідний;
2 – камера стаціонарна; 3 – шлейф свердловини; 4 – заглушка;
5 – манометр; 6 – вентиль;
7 – очисний поршень; 8 – засув
Рисунок 38 – Схема стаціонарного вузла запускання поршнів у місці фонтанної арматури свердловини, де надземна схема прокладання трубопроводу переходить до підземної

Розроблено мобільну камеру запускання очисних поршнів і вузол її під'єднання до трубопроводу у формі трійника, який також треба монтувати у місці відводу трубопроводу, де надземна схема його прокладання переходить у підземну. Перевагою мобільних камер є можливість запускання очисних поршнів без короткочасного припинення експлуатації газопроводу. Також її треба застосовувати, коли надземна частина трубопроводу в місці монтажу камери знаходиться на невеликій висоті над поверхнею землі і немає місця для влаштування стаціонарного вузла запускання поршнів.

Якщо стаціонарний вузол запускання очисних поршнів виконати таким чином, щоб від осі відгалуження рівнопрохідного трійника були рівновіддалені фланець сферичного крана, яким його кріплять до газопроводу, та фланець, до якого кріпиться заглушка, то він може функціонувати як вузол під'єднання мобільних камер запускання очисних поршнів. Для цього відносно проектного положення (довкола осі відгалуження трійника) стаціонарний вузол запускання треба обернути на 180°, що забезпечує його універсальність.



а) – запасування очисного поршня; б), в) – запускання очисного поршня
Рисунок 39 – Стаціонарний вузол запускання очисних поршнів у трубопровід

Аналогічну до стаціонарної камери запускання поршнів розроблено конструкцію стаціонарної камери їх приймання. Однак, відгалуження трійника камери приймання повинно містити решітку, яка запобігає потраплянню в нього поршня і його подальшому руху. Щоб така решітка не була додатковим гідравлічним опором, її запропоновано виконати у вигляді шайби із стрижнями. Даною розробкою також обладнано експериментальні установки. Решітку виготовлено методом 3D-друку з наступним закріпленням на початку відгалуження скляного трійника за допомогою клеєвого з'єднання.

У **сьомому розділі** “Промислова апробація та впровадження технології очищення трубопроводів поршнями із пружних матеріалів” розроблено технологічну послідовність виконання робіт із впровадження технології очищення трубопроводів поршнями із пружних матеріалів. Запропоновано поршень для очищення трубопроводів систем збирання та транспортування газу газових родовищ, газових та теплових мереж підбирати методом прогресивної валідації. Ефективність такої методики підтверджено в умовах реальних трубопроводів. Приведено результати промислової апробації технології очищення трубопроводів поршнями із пружних матеріалів та впровадження її у виробництво. Розроблено план дій у разі застрягання очисного поршня.

Розроблену технологію очищення трубопроводів поршнями із гіперпружних матеріалів апробовано та впроваджено в газопромисловому управлінні “Шебелинкагазвидобування”. Для цього підібрано шлейф свердловини № 101 Західно-Старовірівського ГКР, який містить дві понижені ділянки, де відбувається накопичення рідинних забруднень.

Розроблено конструкторську документацію, на основі якої виготовлено дослідні зразки камери стаціонарної та камери мобільної запускання поршнів для яких розроблено інструкції з монтажу, експлуатації та випробування. Особливістю дослідного зірця стаціонарної камери запускання очисних поршнів є те, що вона може використовуватись, як стаціонарна камера, та бути вузлом під'єднання мобільних камер запускання поршнів. Для цього її потрібно обернути на 180° відносно осі відгалуження трійника. Мобільну камеру запускання очисних поршнів під'єднано до шлейфа свердловини у місці демонтованого відводу (рис. 41).

У результаті очищення шлейфу свердловини послідовним запусканням циліндричного очисного поршня із пружно-полімерної композиції, манжетно-

чашкового із силіконового компаунда та поліуретану, гантельного та гантелеподібного-дводискового із силіконового компаунда гідравлічна ефективність газопроводу збільшилася з 87 % до 98 %, перепад тиску знизився з 0,57 МПа до 0,22 МПа.

а)



б)



а) – запасування гантелеподібного-дводискового поршня із силіконового компаунда в мобільну камеру запускання; б) – запускання очисного поршня за допомогою мобільної камери

Рисунок 41 – Апробація технології очищення трубопроводів поршнями із пружних матеріалів в умовах шлейфа свердловини

Також розроблену технологію промислово апробовано в Тисменицькому управлінні експлуатації газового господарства в умовах газової мережі низького тиску та СП Київтеплоенерго РТМ Печерськ в умовах теплової мережі.

Очищення трубопроводів виконано послідовним запусканням поршнів із силіконового компаунда та поліуретану різної геометричної форми до повного видалення забруднень. Запускання здійснено за допомогою розроблених і експериментально перевірених вузлів. У результаті очищення загальний об'єм рідинних забруднень видалених із газопроводу склав 11,6 л, а з теплопроводу видалено 8,1 кг мулу.

Промислові апробації засвідчили, що трубопроводи систем збирання та транспортування газу газових родовищ, газових і теплових мереж містять перешкоди для руху поршнів із гіперпружних матеріалів, найпоширенішими з яких є виступи у місці зварних швів у порожнину та крутовигнуті відводи. У момент проходження таких перешкод поршнем відбувалося збільшення тиску у запоршневому просторі, величина якого залежить від геометричної форми та твердості матеріалу поршня. Також ці чинники впливають на обсяг винесених поршнем забруднень. Із збільшенням жорсткості очисного поршня за рахунок його геометричної форми та твердості матеріалу відбувалось збільшення ефективності очищення трубопроводу, однак зменшувалась прохідна здатність поршня і збільшується імовірність застрягання.

Під час промислової апробації технології очищення трубопроводів поршнями із пружних матеріалів у виробничих умовах систем збирання та транспортування

газу газових родовищ, газових і теплових мереж виявлено, що практично кожен трубопровід таких систем є унікальним щодо можливості влаштування вузлів запускання/приймання очисних поршнів та його прохідності поршнями. Тому на етапі впровадження технології очищення необхідний індивідуальний підхід до кожного трубопроводу та попередній детальний аналіз.

На основі виконаних досліджень удосконалено геометричну форму дослідних зразків очисних поршнів та розроблено методику прогресивної валідації поршня, яка дає змогу для кожного трубопроводу підібрати індивідуальний поршень. Метод прогресивної валідації полягає у послідовному запусканні поршнів, кожен наступний із яких має мати більшу жорсткість за рахунок твердості матеріалу та/або геометричної форми, і контролю за тиском у запоршневому просторі, що мінімізує ризик застрягання поршня. Геометричну форму та твердість за шкалою Шор А кожного наступного очисного поршня треба підбирати за результатами запускань попереднього на основі аналізу зміни тиску на вході трубопроводу під час руху поршня, стану очисного поршня після проходження усього трубопроводу та результатів очищення. Якщо відбуваються значні збільшення тиску на вході трубопроводу під час руху очисного поршня, поршень під час руху трубопроводом пошкодився або ним видалено великий об'єм забруднень, то треба запустити ще раз контрольний тестовий очисний поршень такої ж геометричної форми та твердості за шкалою Шор А. Коли після повторного запускання одного і того ж поршня повторюється значне збільшення тиску на вході трубопроводу під час його руху, то запускати поршень більшої жорсткості заборонено. Такий підхід дає змогу вирішити проблему унікальності більшості трубопроводів систем збирання та підготовки газу газових родовищ, газових і теплових мереж і при цьому мінімізувати ризик застрягання очисного поршня. Запропонована рекомендована послідовність прогресивної валідації очисних поршнів із пружних матеріалів.

Найбільшою проблемою під час валідації може бути застрягання очисного поршня із нерозчинного матеріалу – силіконового компаунда, поліуретану. Розроблено рекомендований план дій у разі застрягання очисного поршня.

Розроблену методику відображено в технологічній інструкції з внутрішньотрубного очищення трубопроводів поршнями із гіперпружних матеріалів.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено важливу науково-технічну проблему очищення трубопроводів систем збирання та транспортування газу газових родовищ, газових і теплових мереж без виробничо-технологічних втрат енергоносіїв, яке ґрунтується на закономірностях впливу фізико-механічних властивостей матеріалу та геометричної форми суцільнолитих очисних поршнів із пружних матеріалів на динаміку їх руху трубопроводами зі змінною внутрішньою геометрією, величину запоршневого тиску та ефективність очищення.

Основні результати роботи зводяться до наступного.

1. Більшість відомих досліджень, математичних моделей та конструкцій вузлів запускання/приймання поршнів орієнтовані на магістральні трубопроводи високого

тиску з усталеними геометричними параметрами та режимами роботи. У таких працях недостатньо враховано механіку контактної взаємодії поршня з внутрішньою стінкою труби, особливо у випадках з трубопроводами малого діаметра, які містять різноманітні фасонні елементи, напливи в порожнину трубопроводу в місці зварних з'єднань тощо. Відсутні комплексні уявлення про динаміку руху поршнів трубопроводами із змінною внутрішньою геометрією за умов пониженого тиску, методики підбору поршнів для трубопроводів систем збирання та транспортування газу, газових і теплових мереж та конструктивні рішення вузлів їх запускання/приймання.

2. На основі аналізу розробленої механіко-математичної моделі контактної взаємодії рухомого поршня із пружного матеріалу з внутрішньою стінкою трубопроводу змінної геометрії для підвищення прохідної здатності очисних поршнів рекомендовано зменшувати довжину циліндричного суцільнолитого поршня, настільки це можливо без втрати якості очищення, зменшувати коефіцієнт тертя, уникаючи сухих режимів ковзання, збільшувати стисливість та гнучкість циліндричного поршня, використовуючи матеріали з малою твердістю за шкалою Шор А, малим модулем пружності та коефіцієнтом Пуассона або ж застосовувати поршні складної геометричної форми, яка забезпечує малі ефективні пружні константи, зменшувати лобовий опір поршню очищення ділянок із значним скупченням забруднень в кілька проходів.

3. Щоб знайти баланс між ефективністю очищення трубопроводу та прохідною здатністю для виготовлення очисних поршнів підібрано широку лінійку гіперпружних матеріалів із твердістю за шкалою Шор А в межах від 5 до 80 одиниць і розроблено технології виготовлення з них поршнів. Найкращими з підібраних матеріалів для виготовлення суцільнолитих очисних поршнів складної геометричної форми (гантелеподібної, багатодискової, манжетно-чашкової) в діапазоні твердості від 5 до 30 одиниць за шкалою Шор А є силіконовий компаунд, а в діапазоні від 40 до 80 одиниць – поліуретан. Особливістю розробленої технології виготовлення очисних поршнів із таких матеріалів є застосування 3D моделювання для розроблення геометричних форм поршнів та 3D друку для виготовлення ливарних форм. Суцільнолиті циліндричні очисні поршні найлегше виготовляти із пінополіуретану. При цьому дно ливарної форми має бути перфорованим, а ливарну форму треба заповнювати на 60 %.

4. Збільшення жорсткості поршня за рахунок твердості матеріалу та геометричної форми сприяє зменшенню перетікань та підвищенню ефективності очищення. Найбільшою мірою твердість матеріалу на ефективність очищення впливає, коли поршень має циліндричну форму. У разі її збільшення від 5 до 80 одиниць за шкалою Шор А, об'єм залишку води в горизонтальних ділянках експериментального трубопроводу зменшувався в 6 разів від $0,0031 \text{ м}^3$ до $0,0005 \text{ м}^3$, а в понижених – у 15 разів від 15 см^3 до 1 см^3 . Втім за наявності виступів у порожнині трубопроводу збільшення жорсткості поршня призводить до збільшення кількості тимчасових зупинок у таких місцях, збільшення запоршневого тиску в момент зупинки і значного прискорення після зрушення, що супроводжується посиленням перетікань і зменшенням ефективності очищення. Для таких умов рекомендовано застосовувати поршні з підвищеною прохідною здатністю

(манжетно-чашкові, багатодискові із силіконового компаунда з твердістю від 5 до 30 одиниць за шкалою Шор А) та підтримувати швидкість їх руху якомога більшою, але не більше 5 м/с.

5. Аналітичним, чисельним моделюванням та експериментально встановлено, що вигинання поршнів у відводах трубопроводів зумовлює збільшення опору їх руху (до повного заходу у відвід), збільшення величини запоршневого тиску, призводить до їх гальмування та збільшує ризик тимчасової зупинки і застрягання. Із збільшенням твердості матеріалу поршня за шкалою Шор А, а відповідно і модуля пружності, такий ефект посилюються. Манжетно-чашкові поршні з силіконового компаунда демонструють найкращу прохідність відводів за найменшої величини запоршневого тиску, проте зі збільшенням їх твердості за шкалою Шор А від 5 до 80 одиниць необхідний тиск для проходження крутовигнутих відводів збільшувався в 3,9 рази від 0,031 МПа до 0,12 МПа. Гантельні поршні також ефективно долають відводи за рахунок поєднання гнучкої центральної частини та жорсткої передньої, що зменшує контактні сили і сили тертя. Манжетно-чашкові поршні із силіконового компаунда за великих значень коефіцієнтів тертя (внутрішня стінка трубопроводу суха) та циліндричні поршні у відводах трубопроводів відокремлюються від внутрішньої стінки, що спричиняє посилення перетікання, зменшення перепаду тиску і підвищує ризик застрягання. Поліуретанові поршні мають велику жорсткість, а тому тиск у запоршневому просторі для їх проходження крутовигнутими відводами повинен бути у 2–4 рази бути більший, ніж для поршнів із силіконового компаунда.

6. Здатність очисних поршнів із пружних матеріалів проходити трійники трубопроводів, динаміка їх руху такими фасонними елементами визначається характеристиками матеріалу, з якого вони виготовлені, їх геометричною формою, величиною запоршневого тиску і напрямками потоків у трійниках. На основі результатів експериментальних досліджень побудовано схеми руху поршнів трійником трубопроводу для різних напрямів руху потоку. За найменшого запоршневого тиску (до 0,06 МПа) трійники із відгалуження у магістраль проходять манжетно-чашкові очисні поршні із силіконового компаунда завдяки гнучкості осердя та м'яким ущільнювальним елементам (манжетам та чашкам). Трійники, у яких потік із магістралі перетікає у відгалуження, здатні проходити тільки циліндричні очисні поршні при цьому відбувається інверсія їх передньої та задньої частин. У трійниках відбувається пошкодження поршнів із пінополіуретану (виникали поперечні тріщини, відриваються окремі частини), а поршні із поліуретану застрягають. Отримані результати дають підстави для науково обґрунтованого планування маршрутів руху поршнів із гіперпружних матеріалів трубопровідними системами, які містять трійники, та дозволяють оцінювати придатність трубопровідної мережі до застосування поршнів.

Під час проходження поршнями перехідників із більшого на менший діаметр суттєво зростають контактні сили, що призводить до їх зупинки та різкого збільшення величини запоршневого тиску. Такі перешкоди здатні долати тільки силіконові манжетно-чашкові поршні за тиску в запоршневому просторі не менше 0,8 МПа. Пінополіуретанові поршні та поршні з полімерно-пружної композиції руйнуються під час проходження перехідників із більшого на менший діаметр труб.

7. Базуючись на встановлених закономірностях руху дослідних зразків очисних поршнів фасонними елементами трубопроводів, розроблено конструкції вузлів запускання/приймання поршневих засобів у трубопроводи. Запропоновано виконувати їх корпус у формі рівнопрохідного трійника та його встановлювати в місці відводу, де надземна схема прокладання трубопроводу переходить у підземну, що ефективно вирішує проблеми конструктивних обмежень (нерівнопрохідна арматура, відводи, трійники тощо) та обмеженості простору, які є характерними для надземних ділянок трубопроводів систем збирання та транспортування газу газових родовищ, газових і теплових мереж. Конструктивна універсальність стаціонарного вузла запускання очисних поршнів забезпечує можливість його обертання на 180° для використання в якості вузла під'єднання мобільних камер запускання очисних поршнів. Також розроблено вузол приймання і видалення очисних поршнів із трубопроводу, принцип роботи якого базується на зупинці очисного поршня у перехіднику із більшого на менший діаметр труб, що фіксується манометрами, на перекриванні трубопроводу за поршнем та видаленні поршня реверсною подачею транспортованого продукту через відгалуження трійника із сферичним краном. На вузли запускання-приймання поршнів із гіперпружних матеріалів у трубопроводи розроблено конструкторську документацію, за якою виготовлено дослідні зразки зі скла та металу, які апробовано в лабораторних і промислових умовах.

8. Розроблено науково-методичні підходи та промислово апробовано покроковий алгоритм виконання робіт із впровадження технології внутрішньотрубного очищення трубопроводів поршнями із гіперпружних матеріалів, що передбачає облаштування вузлів запускання та приймання очисних поршнів та методику прогресивної валідації очисного поршня. Остання полягає у послідовному запусканні тестових очисних поршнів із поступовим збільшенням жорсткості поршня, за рахунок твердості матеріалу та/або геометричної форми, що дозволяє мінімізувати ризик застрягання поршня. Кожен наступний очисний поршень треба підбирати за результатами запускання попереднього на основі аналізу зміни величини вхідного тиску під час руху поршня, оцінки стану очисного поршня після проходження трубопроводу та результатів очищення. Результати виконаних досліджень, покроковий алгоритм виконання робіт із впровадження технології внутрішньотрубного очищення трубопроводів поршнями із гіперпружних матеріалів промислово апробовані у виробничих умовах трубопроводів систем збирання та транспортування газу газових родовищ, газових та теплових мереж і впроваджені в діяльності ГПУ "Шебелинкагазвидобування" АТ "Укргазвидобування".

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації

1. **Stetsiuk S. M.** Experimental investigation of the movement patterns and deformation of the pigs when passing through a pipe elbow and reducer / S. M. Stetsiuk, Ya. V. Doroshenko, Yu. I. Doroshenko, O. O. Filipchuk, V. Ya. Grudz // *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. 2024. Vol. 124, Issue 2. P.

49–64. **(індексується в Scopus, кuartиль Q3)**. Автор брав участь у розробленні та виготовленні очисних поршнів, експериментальних установок, провів дослідження динаміки руху поршнів фасонними елементами трубопроводів, визначив необхідний для їх проходження запоршневий тиск. DOI: 10.5604/01.3001.0054.7759

2. **Stetsiuk S. M.** Analytical study of frictional interaction of elastic cleaning pig with pipeline wall / S. M. Stetsiuk, I. P. Shatskyi, Ya. V. Doroshenko, A. S. Velychkovych // *Archives of Materials Science and Engineering*. 2024. Vol. 129, Issue 2. P. 67–76. **(індексується в Scopus, кuartиль Q3)**. Автор брав участь у формулюванні та розв'язанні задачі контактної взаємодії деформівного поршня зі стінкою трубопроводу, отримав аналітичне розв'язання для руху поршня з натягом, побудував залежності запоршневого тиску від параметрів системи. DOI: 10.5604/01.3001.0054.9194

3. **Stetsiuk S. M.** Numerical and laboratory experimental analysis of the movement of silicone cleaning pigs through 90-degree bends pipe / S. M. Stetsiuk, Ya. V. Doroshenko, O. O. Filipchuk, Z. V. Daniv, V. B. Volovetskyi // *Archives of Materials Science and Engineering*. 2024. Vol. 126, Issue 2. P. 65–77. **(індексується в Scopus, кuartиль Q3)**. Автор розробив 3D-моделі поршнів і відводів трубопроводу, виконав чисельне моделювання їх взаємодії, дослідив вплив положення поршня у відводі та коефіцієнта тертя на еквівалентні напруження Мізеса. DOI: 10.5604/01.3001.0054.6831

4. **Stetsiuk S.** Experimental studies on the dynamics of the movement of cleaning pigs through tee pipe fittings / S. Stetsiuk, R. Bondarenko, Y. Doroshenko, V. Holubenko // *Strojnícky časopis – Journal of Mechanical Engineering*. 2024. Vol. 74, NO 1. P. 9–24. **(індексується в Scopus, кuartиль Q3)**. Автор брав участь у виготовленні циліндричних поршнів, розробленні експериментальних установок, дослідив динаміку їх руху трійниками трубопроводів, описав відповідні закономірності та побудував схеми руху. DOI: 10.2478/scjme-2024-0002

5. **Stetsiuk S.** Investigation on the dynamics of movement of cylindrical cleaning pigs through the bends of pipeline systems for fluid transportation / S. Stetsiuk, Y. Doroshenko, R. Bondarenko, O. Filipchuk, V. Volovetskyi // *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*. 2024. Vol. 123. P. 303–317. **(індексується в Scopus, кuartиль Q4)**. Автор визначив контактні сили нормальної реакції при вигині поршнів у відводах, встановив вплив модуля пружності на їх величину, запропонував методику визначення за яких умов поршині будуть проходити відводи та отримав рівняння для розрахунку мінімально допустимої швидкості їх руху на вході у відвід. DOI: 10.20858/sjsutst.2024.123.15

6. Volovetskyi V. B. Development of foam-breaking measures after removing liquid contamination from wells and flowlines by using surface-active substances / V. B. Volovetskyi, Ya. V. Doroshenko, **S. M. Stetsiuk**, S. V. Matkivskyi, O. M. Shchyrba, Y. M. Femiak, G. M. Kogut // *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. 2022. Vol. 114, Issue 2. P. 67–80. **(індексується в Scopus, кuartиль Q3)**. Автор описав причини накопичення рідких забруднень у газопроводах, проаналізував ускладнення при їх видаленні ПАР, виконав CFD-моделювання руйнування піни вуглеводневим конденсатом. DOI: 10.5604/01.3001.0016.2157

7. Volovetskyi V. B. Development of methods for predicting hydrate formation in gas storage facilities and measures for their prevention and elimination / V. B. Volovetskyi, Ya. V. Doroshenko, S. V. Matkivskyi, P. M. Raiter, O. M. Shchyrba, **S. M. Stetsiuk**, H. Ya. Protsiuk // *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. 2023. Vol. 117, Issue 1. P. 25–41. **(індексується в Scopus, квартиль Q3)**. Автор визначив зони ймовірного скупчення рідких забруднень і гідратів у газопроводах, проаналізував методи їх попередження та усунення та склав перелік найприйнятніших методів боротьби з гідратоутворенням. DOI: 10.5604/01.3001.0053.5955

8. **Стецюк С. М.** Експериментальні дослідження ефективності очищення внутрішньої порожнини трубопроводів поршнями із гіперпружних матеріалів. *Нафтогазова енергетика*. 2022. № 2(38). С. 62–75. **(наукове фахове видання України)**. DOI: 10.31471/1993-9868-2022-2(38)-62-75

9. **Стецюк С. М.** Розроблення конструктивних рішень із обладнання трубопровідних систем вузлами запускання та приймання очисних поршнів // *Нафтогазова енергетика*. 2023. № 2(40). С. 53–65. **(наукове фахове видання України)**. DOI: 10.31471/1993-9868-2023-2(40)-53-65

10. **Стецюк С. М.** Експериментальні дослідження динаміки руху очисних поршнів із гіперпружних матеріалів відводами і перехідниками трубопроводів *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2022. № 4(85). С. 28–42. **(наукове фахове видання України)**. DOI: 10.31471/1993-9973-2022-4(85)-28-42

11. **Стецюк С. М.** Деформації та закономірності руху очисних поршнів із гіперпружних матеріалів рівнопрохідними трійниками трубопроводів // *Нафтогазова енергетика*. 2024. № 2(42). С. 17–29. **(наукове фахове видання України)**. DOI: 10.31471/1993-9868-2024-2(42)-17-29

12. **Стецюк С. М.** Оцінка впливу дотичних напружень та їх пульсацій на пропускну здатність газопроводу // *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2013. № 2(47). С. 72–78. **(наукове фахове видання України)**.

13. **Стецюк С. М.** Дослідження локального газовмісту в промислових газопроводах під час транспортування газорідинних сумішей. *Проблеми нафтогазової промисловості: зб. наук праць*. 2012. Вип. 10. С. 332–339. **(наукове фахове видання України)**.

14. **Стецюк С. М.** Дослідження впливу геометричної форми та матеріалу поршнів на ефективність очищення трубопроводів / **С. М. Стецюк**, Я. В. Дорошенко, Р. В. Бондаренко, О. О. Філіпчук, Ю. І. Дорошенко // *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2023. 4(89). С. 26–43. **(наукове фахове видання України)**. Автор брав участь у розробленні технології виготовлення та тестуванні дослідних очисних поршнів, дослідженні їх прохідної здатності й ефективності очищення ними трубопроводів, коригуванні їх геометричної форми та розробці плану прогресивної верифікації для систем збирання та транспортування газу газових родовищ, тепло- і газопостачання. DOI: 10.69628/pdogf/4.2023.26

15. Голубенко В. П., **Стецюк С. М.**, Філіпчук О. О. Аналіз методик визначення втрат газу під час продувань шлейфів і свердловин для видалення рідинних накопичень. *Нафтогазова енергетика*. 2023. № 1(39). С. 24–35. **(наукове**

фахове видання України). Автор описав методи видалення рідинних забруднень для стабілізації роботи свердловин і газопроводів, проаналізував переваги та недоліки методу продування й оцінив похибки у визначенні втрат газу за існуючими методиками. DOI: 10.31471/1993-9868-2023-1(39)-24-34

16. Дорошенко Я. В. Технології безтраншейної реновації трубопровідних систем / Я. В. Дорошенко, С. М. Стецюк, Р. В. Бондаренко, З. В. Данів // *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2023. № 2(87). С. 17–32. **(наукове фахове видання України).** Автор розглянув порядок підготовки трубопроводів до внутрішньотрубної реновації, виконав огляд, аналіз технологій очищення, внутрішньотрубного обстеження трубопроводів, визначив їх можливості, описав переваги. DOI: 10.31471/1993-9973-2023-2(87)-17-32

17. Дорошенко Я. В. Сучасні технології будівництва промислових газонафтопроводів / Я. В. Дорошенко, В. А. Кучерявий, Н. М. Андрієшин, С. М. Стецюк, Ю. М. Левкович // *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2019. № 3(72). С. 19–31. **(наукове фахове видання України).** Автор розглянув особливості очищення та випробування гнучких композитних трубопроводів із пропусканням очисного поршня, здійснив огляд матеріалів, які застосовуються для його виготовлення. DOI: 10.31471/1993-9973-2019-3(72)-19-31

18. Дорошенко Я. В. Перспективи та проблемні питання становлення і розвитку водневої енергетики в Україні / Я. В. Дорошенко, М. О. Карпаш, С. М. Стецюк, Р. М. Бабельський, В. Б. Воловецький // *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2022. № 1(82). С. 7–33. **(наукове фахове видання України).** Автор обґрунтував необхідність декарбонізації нафтогазової галузі, встановив вплив додавання водню на швидкість газової суміші та накопичення забруднень у трубопроводі. DOI: 10.31471/1993-9973-2022-1(82)-7-33

19. Братах М. І. Обґрунтування доцільності оптимізації робочих тисків з використанням спеціалізованого програмного комплексу PipeSim / М. І. Братах, Р. В. Шимановський, С. М. Стецюк, В. П. Голубенко, Д. В. Усіченко, В. А. Романова // *Нафтогазова галузь України*. 2019. № 3. С. 36–41. **(наукове фахове видання України).** Автор у програмному продукті PipeSim оцінив параметри багатофазового потоку в контрольних точках системи та отримав криві фазової рівноваги для моделювання його руху від привибійної зони до пункту збору.

20. Колбушкін Ю. П. Використання виробничого потенціалу ПАТ «Укргазвидобування» для нарощування власного видобутку газу та конденсату (на прикладі реконструкції Червонодонецької ДКС) / Ю. П. Колбушкін, О. М. Гордієнко, Ю. Л. Фесенко, С. В. Кривуля, В. В. Марущенко, Н. М. Андрієшин, С. М. Стецюк // *Нафтогазова галузь України*. 2018. № 3. С. 3–10. **(наукове фахове видання України).** Автор охарактеризував особливості роботи родовищ ПАТ «Укргазвидобування», їх вплив на режимні параметри свердловин і гідравлічний стан. Описав наслідки різкого зниження тиску на гирлах і зростання депресій.

Додаткові публікації

Патенти за темою дисертаційного дослідження

21. Камера приймання внутрішньотрубних засобів: пат. 154878 Україна: МПК В08В 9/04. № у 202302784; заявл. 08.06.2023; опубл. 27.12.2023, Бюл. № 52. 3 с. Автор: **Стецюк С. М. (патент на корисну модель)**.

22. Пристрій для запускання внутрішньотрубних засобів у трубопроводі: пат. 154881 Україна: МПК В08В 9/04. № у 202302895; заявл. 15.06.2023; опубл. 27.12.2023, Бюл. № 52. 3 с. Автори: Братах М. І., **Стецюк С. М.**, Дорошенко Я. В., Усіченко Д. В. (**патент на корисну модель**). Автор для з'єднання пристрою з кінцями трубопроводу у місці демонтованої катушки запропонував ідею застосовувати циліндричні герметизатори із резиновими ущільненнями та фланцями. Також для утримування циліндричних герметизаторів запропонував ідею до їх фланців шпильками приєднувати затискачі, які стягувати довкола трубопроводу.

23. Універсальний пристрій запускання внутрішньотрубних засобів у трубопроводі: пат. 155222 Україна: МПК В08В 9/04. № у 202302780; заявл. 08.06.2023; опубл. 31.01.2024, Бюл. № 5. 6 с. Автори: Братах М. І., Дорошенко Я. В., **Стецюк С. М.**, Усіченко Д. В. (**патент на корисну модель**). Автор запропонував ідею камеру запускання поршнів виконувати у вигляді трійника, який треба монтувати у місці крутозагнутого відводу (коліна) чи кутової арматури трубопроводу, де надземна схема його прокладання переходить у підземну. Також запропонував ідею пристрій запускання внутрішньотрубних засобів у трубопроводі використовувати як вузол під'єднання вертикальних мобільних камер.

24. Пристрій для приймання та видалення очисних поршнів із трубопроводу: пат. 158002 Україна: МПК В08В9/04, В65G51/00. № у 202402991; заявл. 06.06.2024; опубл. 18.12.2024, Бюл. № 51/2024. 3 с. Автори: Дорошенко Я. В., **Стецюк С. М.**, Григорський С. Я., Маркевич М. В. (**патент на корисну модель**). Автор запропонував ідею гальмувати і зупиняти поршень у перехіднику з більшого на менший діаметр труб. Щоб видаляти очисний поршень із трубопроводу запропоновано ідею пристрій обладнати трійником із приєднаним до його відгалуження рівнопрохідним краном, а видалення поршня здійснювати реверсною подачею потоку.

Праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

25. Дорошенко Я. В., **Стецюк С. М.**, Філіпчук О. О. Дослідження впливу геометричної форми поршнів на ефективність очищення трубопроводів. *Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні. ІТММ 2024*: матеріали Міжнар. наук.-технічн. конф., м. Дніпро, 10–11 квітня 2024 р. Дніпро, 2024 – С. 358–362.

26. **Стецюк С. М.**, Дорошенко Я. В. Розроблення технологій очищення внутрішньої порожнини трубопроводів систем збору газу газових родовищ для запобігання викидів парникових газів в атмосферу. *Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування*:

зб. матер. IX Міжнар. молодіжного конгресу, м. Львів, 28–29 березня 2024 р. Київ, 2024 – С. 33.

27. Експериментальні дослідження динаміки руху очисних поршнів із гіперпружних матеріалів фасонними елементами трубопроводів / Я. В. Дорошенко, **С. М. Стецюк**, О. В. Іванов, О. О. Філіпчук // *Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС–2024)*: матеріали тез доповідей XIV Міжнар. науково-практичної конф., м. Чернігів, 23–24 травня 2024 р. Чернігів, 2024. – Т. 2. – С. 207–208.

28. Про фрикційну взаємодію деформівного поршня зі стінкою трубопроводу / **С. Стецюк**, І. Шацький, Я. Дорошенко, А. Величкович // *Математичні проблеми механіки неоднорідних структур*: збірн. наукових праць 11-ї Міжнародної наукової конф., м. Львів, 24–26 вересня 2024 р. Львів, 2024. – С. 141.

29. Теоретико-експериментальне дослідження руху очисного поршня у звуженій ділянці трубопроводу / **С. М. Стецюк**, Я. В. Дорошенко, І. П. Шацький, А. С. Величкович // *Математичні проблеми технічної механіки – 2024*: матеріали Міжнар. наукової конф., м. Дніпро, 17–19 вересня 2024 р. Дніпро, 2024. – С. 194–195.

30. Роль поперечного обтиснення в задачі просування стержня у криволінійному каналі / І. П. Шацький, **С. М. Стецюк**, А. С. Величкович, Я. В. Дорошенко // *Механіка: сучасність і перспективи – 2024*: матеріали доповідей Міжнар. наукової конф., м. Київ, 7–11 жовтня 2024 р. Київ, 2024. – С. 129.

31. Дорошенко Я., **Стецюк С.** Розроблення технологічної послідовності валідації очисного поршня для трубопровідних систем збору та підготовки газу газових родовищ, мереж газо- і теплопостачання. *Сталий розвиток: виклики та реалії здійснення (Україна-світ)*: збірн. матеріалів Всеукраїнської науково-практичної конф. здобувачів і молодих вчених, м. Івано-Франківськ, 22 травня 2024 р. Івано-Франківськ, 2024 – С. 10–12.

32. **Стецюк С. М.** Дослідження динаміки руху очисних поршнів шлейфами свердловин газових родовищ. *Стратегічні орієнтири сталого розвитку в Україні та світі*: збірн. тез доповідей II Міжнародної науково-практичної конф. молодих учених, м. Чернігів, 21 квітня 2023 р. Чернігів, 2023 – С. 43–45.

33. Нарощування обсягів власного видобутку вуглеводневої сировини ДК «Укргазвидобування» – запорука енергетичної безпеки держави / М. І. Мачужак, С. О. Паюк, С. В. Кривуля, **С. М. Стецюк**, Т. М. Галко, В. В. Аксьонов // *Стан, проблеми та перспективи нафтогазової промисловості України*: матеріали Міжнародної науково-практичної конф., м. Борислав, 7–9 вересня 2012 р. Львів, 2012. – С. 22.

34. **Стецюк С. М.**, Дорошенко Я. В. Експериментальне визначення ефективності застосування поршнів із гіперпружних матеріалів для очищення трубопроводів. *Modern methods of solving scientific problems of reality: proceedings of XXXV Inter. scientific and practical conf.*, с. Varna, 05–08 september 2023 y. Varna, Bulgaria, 2023 – P. 178–180.

35. Results of experimental studies of the dynamics of movement of a cleaning piston made of hyperelastic material for displacing liquid plugs / S. Hryhorskiy, V. Zapukhliak, O. Ivanov, Y. Doroshenko, **S. Stetsiuk** // *Scientific review of the actual*

events, achievements and problems: collection of scientific papers: proceedings of the II International scientific and theoretical conf., c. Berlin, 31 may 2024 y. Berlin, Germany, 2024 – P. 129–131.

36. **Стецюк С.**, Дорошенко Я. Розроблення заходів із підвищення ефективності експлуатування трубопроводів систем збирання газу газових родовищ: програма тридцять четвертої наукової сесії наукового товариства ім. Шевченка, м. Івано-Франківськ, 01–17 березня 2023 р. Івано-Франківськ, 2023 – С. 20.

37. **Стецюк С.**, Дорошенко Я. Експериментальні дослідження динаміки руху очисних поршнів із гіперпружних матеріалів фасонними елементами трубопроводів: програма тридцять п'ятої наукової сесії наукового товариства ім. Шевченка, м. Івано-Франківськ, 04–23 березня 2024 р. Івано-Франківськ, 2024 – С. 24.

Опубліковані праці, які додатково відображають наукові результати дисертації

38. Дорошенко Я. В., **Стецюк С. М.** Спорудження магістральних трубопроводів: лабораторний практикум. Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2023. 66 с.

39. Застосування технології вилучення рідини з газопроводу під тиском за допомогою з'ємного дренажного пристрою / Р. В. Шимановський, **С. М. Стецюк**, В. А. Коляденко, І. О. Шапар, Д. В. Усіченко // *Питання розвитку газової промисловості України*. 2020. Вип. XLVIII. С. 112–117.

40. **Stetsiuk S.**, Dobrunov D., Romanova V. Optimization of flowing pressures and flow assurance in the gas gathering system by flowlines disconnection at Efremivske gas-condensate field, “Ukrigasvydobuvannya”, JSC. *Питання розвитку газової промисловості України*. 2019. Вип. XLVII. С. 174–180.

41. Особливості конструкції свердловин на родовищах, що знаходяться на завершальній стадії розробки / С. М. Демченко, А. А. Лиско, Ю. І. Мілютенко, **С. М. Стецюк**, О. Ю. Чайковська // *Питання розвитку газової промисловості України*. 2013. Вип. XLI. С. 74–79.

42. Процків Р. І., **Стецюк С. М.**, Бобрук О. В. Програмно-інформаційний комплекс об'єктів Юльївського, Перещепінського та Краснокутського газоконденсатного родовищ. *Питання розвитку газової промисловості України*. 2012. Вип. XL. С. 275–280.

43. Оцінка стійкості роботи газоконденсатних свердловин на прикладі Більського родовища / С. В. Булка, В. В. Соболев, **С. М. Стецюк**, Н. С. Вакуленко // *Питання розвитку газової промисловості України*. 2010. Вип. XXXVIII. С. 151–155.

44. Програмний комплекс GazStrum як вітчизняна альтернатива інженерного методу розрахунку двофазних потоків / **С. М. Стецюк**, І. І. Капцов, О. В. Бобрук, В. В. Соболев // *Питання розвитку газової промисловості України*. 2009. Вип. XXXVII. С. 280–287.

АНОТАЦІЯ

Стецюк С. М. Розвиток наукових основ очищення промислових трубопроводів поршневими засобами. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.15.13 – трубопровідний транспорт, нафтогазосховища. – Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, МОН України, Івано-Франківськ, 2025.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню важливої науково-технічної проблеми очищення трубопроводів систем збирання та транспортування газу газових родовищ, газових і теплових мереж без виробничо-технологічних втрат енергоносіїв. Досліджено процеси очищення поршнями з пружних матеріалів трубопроводів із горизонтальними та пониженими ділянками. Визначено величину необхідного запоршневого тиску для їх проходження прямолінійними ділянками та фасонними елементами трубопроводів. Комплексно досліджено механіку контактної взаємодії поршнів із стінкою трубопроводу, їх напружений стан, деформації з урахуванням геометрії трубопроводу, фізико-механічних властивостей матеріалу поршня та його геометричної форми. Розроблено конструктивні рішення із запускання/приймання поршнів у трубопроводи, які містять конструктивні та просторові обмеження. Сформовано науково-методичні підходи із впровадження технології очищення трубопроводів поршнями із пружних матеріалів.

Ключові слова: трубопровід, тривала експлуатація, забруднення, очисний поршень, пружний матеріал, ефективність очищення, динаміка руху, напружено-деформований стан, вузол запускання, внутрішньотрубна корозія.

ANNOTATION

Stetsiuk S. M. Development of Scientific Foundations of Cleaning Industrial Pipelines by Pig Means. – Qualifying scientific work with the manuscript copyright.

The dissertation for a doctor of technical sciences degree in specialty 05.15.13 – pipeline transportation, oil and gas storages. – Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ministry of Education and Science of Ukraine, Ivano-Frankivsk, 2025.

A mechanical-mathematical problem of the contact interaction between a deformable cleaning pig and a local axisymmetric constriction in the pipeline was formulated and solved. Based on the constructed analytical solution, solutions were obtained for specific cases: the motion of an elastic pig through a pipeline with a constant inner diameter, motion of a pig press-fitted into the pipeline with uniform interference, passage through a conical reducer from a larger to a smaller pipe diameter, and passage over a weld bead protruding into the pipe interior. For these cases, the patterns of the influence of mechanical and geometric parameters on the stress state of the pig and the

required back space pressure were determined. Recommendations were developed for pig modeling to improve their passability through pipelines.

3D models were created, fabrication technologies were developed, and experimental samples of cleaning pigs with various geometric shapes were manufactured from different elastic materials (polyurethane, silicone compound, silicone sealant, and polyurethane foam) with Shore A hardness ranging from 5 to 80 units. The advantages and disadvantages of each material were identified.

Experimental setups made of glass pipes with extended horizontal and lowered sections were developed and assembled. The influence of the Shore A hardness and geometric shape of the cleaning pig on the cleaning efficiency of pipelines was experimentally determined. The dynamics of pig motion through horizontal sections of pipelines and through zones with small internal protrusions were studied. Recommendations were proposed for cleaning pipelines containing a large number of minor internal protrusions, particularly in the areas of welded joints.

The influence of the bending of solid elastic pigs in pipeline elbows on their motion dynamics, stress state, and deformations was studied analytically, numerically, and experimentally. An analytical solution to the contact problem between a deformable pig and a curved pipeline section (elbow) was obtained. Patterns of transverse contact pressure distribution along the pig and the variation of back space pressure during its movement through the elbow were established. An equation was derived for calculating the minimum permissible velocity of a cylindrical elastic pig at the entrance to a pipeline elbow to ensure its passage without stopping or getting stuck. Numerical modeling using Yeo's strain energy potential model, which describes the nonlinear behavior of elastic materials, was applied to investigate the influence of the pig's position within the bend on the distribution of von Mises equivalent stresses and its deformation.

Experimental setups composed of glass and metal pipes with fittings (elbows, equal-diameter tees, and reducers from larger to smaller pipe diameters) were developed and assembled. Patterns of deformation of pigs during their movement through pipeline fittings were described. Zones of severe compression, stretching, bending, adhesion, and detachment from the inner wall were identified. Factors leading to temporary stoppage, jamming of pigs, and the mechanisms of their failure in pipeline fittings were described. The influence of flow direction through tees, pig length and material, and flow rate on the dynamics of pig movement through tees was experimentally determined.

The back space pressure at which experimental pigs pass through bends, tees, and reducers was established. The influence of Shore A hardness and pig geometry on the required back space pressure for passing pipeline fittings was confirmed experimentally.

It was proposed to install pig launching and receiving units at pipeline elbows where the above-ground layout transitions to underground. To implement this and prevent pipeline emptying during pig launching and receiving, structural solutions were developed that involve installing a tee at the corresponding pipeline section, into which the pig is inserted (for launching chambers) or removed (for receiving chambers). Designs of receiving units that can be installed at straight above-ground sections of the pipeline were developed. Experimental testing was conducted on the developed prototypes of launching and receiving units, as well as pig removal from the pipeline.

A technological sequence for implementing the pipeline cleaning technology using elastic pigs was developed, which provides an individual approach for each pipeline. It was proposed to select pigs for cleaning gas gathering and transportation pipelines using a method of progressive validation through a series of sequential pig launches, where each subsequent pig has increased stiffness due to higher material hardness and/or geometric adjustments. The effectiveness of this method was confirmed under real pipeline operating conditions. The results of industrial testing and implementation of the cleaning technology using elastic pigs were presented. Pressure increases were recorded at the beginning of pipelines selected for industrial testing as each pig sample passed through elbows and weld bead protrusions. The volume of contaminants removed from the pipeline by each pig sample was determined. An action plan was developed for cases when a cleaning pig becomes stuck in the pipeline.

Key words: pipeline, long-term operation, contamination, cleaning pig, elastic material, cleaning efficiency, motion dynamics, stress-deformation state, launching unit, internal pipeline corrosion.