

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

Дорошенко Ярослав Васильович



УДК 622.691.4: 622.692.4

НАУКОВІ ОСНОВИ ОЦІНЮВАННЯ ЕНЕРГОВИТРАТНОСТІ ТА
ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ СКЛАДНИХ ТРУБОПРОВІДНИХ
СИСТЕМ

Спеціальність 05.15.13 – трубопровідний транспорт, нафтогазосховища

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Івано-Франківськ – 2020

Дисертацією є рукопис.

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

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
Грудз Ярослав Володимирович,
Івано-Франківський національний технічний
університет нафти і газу, професор кафедри
газонафтопроводів та газонафтосховищ.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, доцент
Говдяк Роман Михайлович,
ТОВ “Інжинірингова компанія “Машекспорт”,
м. Київ, генеральний директор;

доктор технічних наук, професор
Тітлов Олександр Сергійович,
Одеська національна академія харчових технологій,
м. Одеса, завідувач кафедри нафтогазових технологій,
інженерії та теплоенергетики;

доктор технічних наук, професор
Харченко Євген Валентинович,
Національний університет “Львівська політехніка”,
м. Львів, завідувач кафедри опору матеріалів та
будівельної механіки.

Захист відбудеться 22 грудня 2020 року о 10 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 20.052.04 Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу за адресою: 76019, Україна, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15.

Із 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.

Автореферат розісланий 20 листопада 2020 року.

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



А. П. Джус

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Сучасні складні трубопровідні системи є розгалуженими мережами трубопроводів, які містять велику кількість фасонних елементів. У внутрішній порожнині таких елементів змінюється напрям потоку, що спричиняє нерівномірний складний розподіл тиску, швидкості, перерозподіл фаз багатозфазних потоків, що зумовлено різною їх густиною. Ці процеси зумовлюють збільшення втрат гідравлічної енергії потоку, ерозійне зношування та впливають на працездатність цих елементів. Більше того вони накладаються один на одного і на складну тривимірну геометричну форму таких фасонних елементів трубопроводів. Тому для оцінювання енерговитратності складних трубопровідних систем, забезпечення їх працездатності потрібне всебічне дослідження фізичної картини руху потоків фасонними елементами; дослідження впливу газодинамічних процесів у їх внутрішній порожнині на втрати гідравлічної енергії, ерозійне зношування, напружено-деформований стан; розроблення ефективних технологій ремонту таких елементів. Особливо актуальним це є сьогодні, коли більшість родовищ вуглеводнів в Україні експлуатується на завершальній стадії розробки в умовах низьких тисків, а видобутий продукт характеризується високим вмістом пластової води і вуглеводневого конденсату, частинок породи та піску. Що ж до магістральних газопроводів, то обсяги транспортування газу ними останніми роками є значно меншим за проектні. Тому компресорні станції таких магістральних газопроводів працюють через одну. За таких режимів роботи тиск уздовж газопроводу між працюючими компресорними станціями зменшується на величину більшу, ніж це передбачено проектом. Робота трубопроводів в умовах знижених тисків зумовлює збільшення швидкості потоку. Збільшення швидкості трубопровідних потоків, збільшення обсягу забруднень трубопроводів призводить до збільшення втрат гідравлічної енергії в фасонних елементах, посилення інтенсивності їх ерозійного зношування. Ерозійні дефекти можуть призвести до катастрофічних наслідків і є надзвичайно небезпечними для персоналу, який працює в безпосередній близькості, оскільки вони є внутрішньотрубними і візуально непомітними та непередбачуваними. До того ж більшість фасонних елементів розміщені в об'язках різних технологічних об'єктів. Розуміння механізмів ерозійного зношування фасонних елементів трубопровідних систем є основою для обстеження їх технічного стану.

Масштаби втрат енергії, процеси ерозійного зношування, їх вплив на напружено-деформований стан, працездатність фасонних елементів трубопровідних систем ще недостатньо вивчені, оскільки залежать від багатьох чинників і є надзвичайно складними. Сьогоднішні вимоги енергоефективності, безпеки вимагають звернути увагу на багато аспектів і питань щодо проектування, обстеження та реконструкції різноманітних трубопровідних систем. Тому дослідження втрат енергії потоків у трубопровідних фасонних елементах, дослідження їх ерозійного зношування, напружено-деформованого стану, розроблення ефективних технологій ремонту таких елементів є актуальною задачею.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, роботами. Дисертаційне дослідження виконувалось у межах плану держбюджетної науково-

дослідної програми ІФНТУНГ і є фрагментом комплексної науково-дослідної роботи “Вдосконалення технологічних процесів проектування, спорудження та експлуатації газонафтопроводів і газонафтосховищ з врахуванням вимог енергоефективності” (держбюджетна науково-дослідна тема ІФНТУНГ 2018 – 2021 роки, номер державної реєстрації 0118U007132).

Також дисертаційна робота виконана у відповідності з планом науково-дослідної роботи ДЗ 77/2019 “Розроблення екологічно безпечної технології контролю структури та складу газорідинних потоків” (держбюджетна науково-дослідна робота ІФНТУНГ 2019 – 2020 роки, номер державної реєстрації 0119U002939) і науково-дослідної роботи № НДІ-126/20п-19 ДП “Науканафтогаз” “Розроблення національного стандарту з проектування, будівництва, контролю якості та приймання робіт для газопроводів з гнучких композитних труб”.

Мета і завдання дослідження. Мета дисертаційної роботи полягає в розробленні наукових основ оцінювання енерговитратності та забезпечення працездатності складних трубопровідних систем шляхом досліджень особливостей руху однофазних і багатofазних потоків фасонними елементами, їх напружено-деформованого стану, процесів ерозійного зношування та ремонту.

Завдання дисертаційної роботи:

- проаналізувати сучасні підходи та результати досліджень щодо забезпечення ефективності функціонування та безаварійності складних трубопровідних систем;
- визначити закономірності газодинамічних процесів, втрат гідравлічної енергії трубопровідних потоків у фасонних елементах;
- визначити та дослідити траєкторії руху дисперсних фаз фасонними елементами трубопроводів;
- визначити закономірності впливу геометричних параметрів фасонних елементів трубопроводів, режимних параметрів транспортування та характеристик дисперсних фаз на місцезнаходження та інтенсивність ерозійного зношування таких елементів;
- дослідити вплив ерозійного зношення фасонних елементів трубопровідних систем на їх напружено-деформований стан;
- розробити технологію безтраншейного ремонту складних трубопровідних систем, які містять декілька дефектних відводів.

Об’єкт дослідження – процеси транспортування газоподібних та рідких речовин складними трубопровідними системами.

Предмет дослідження – динаміка руху однофазних і багатofазних потоків та її вплив на втрати гідравлічної енергії і працездатність фасонних елементів трубопровідних систем.

Методи дослідження. Виконані в роботі дослідження базуються на застосуванні 3D моделювання фасонних елементів складних трубопровідних систем, CFD (Computational Fluid Dynamics – обчислювальна гідродинаміка) моделюванні з застосуванням скінченно-об’ємних методів розв’язання рівнянь газогідродинаміки, ейлерової моделі Mixture (модель багатofазної суміші), лагранжевої моделі DPM (Discrete Phase Model – модель дисперсної фази), моделі Фінні (модель ерозійного зношування). Чисельне моделювання напружено-деформованого стану фасонних елементів трубопровідних систем було виконане

методом скінченних елементів. Виконувалась візуалізація результатів моделювання та системний аналіз структури однофазних, багатофазних потоків у фасонних елементах трубопроводів, ерозійного зношування і напружено-деформованого стану їх стінки. Математична модель, яка описує напружено-деформований стан ерозійно-корозійно зношених відводів трубопроводів, містить систему рівнянь рівноваги в рамках лінійної теорії крученості, яка була зведена до одного рівняння, що є основним рівнянням задачі Ламе. Для експериментального визначення місць та інтенсивності ерозійного зношування фасонних елементів було виготовлено експериментальну установку та виконано ультразвукові вимірювання фактичної товщини стінки відводів і трійників магістральних газопроводів. Здійснено математичне моделювання й експериментальні дослідження процесу протягування поршнем рукава трубопроводом, який містить ерозійно чи корозійно зношений відвід. Застосовувались методи математичного планування і виконання експериментів та обробки їх результатів. Основні висновки роботи узгоджуються з відповідними даними теоретичних та експериментальних досліджень.

3D моделювання фасонних елементів виконано в системі автоматизованого проектування і креслення AutoCAD. CFD моделювання однофазних, багатофазних потоків, ерозійного зношування було виконано в програмному комплексі ANSYS Fluent Academic. Чисельне моделювання напружено-деформованого стану в програмному комплексі ANSYS Static Structural Academic.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в отриманні якісно нових результатів щодо впливу динамічних процесів у внутрішній порожнині складних трубопровідних систем на їх енерговитратність, працездатність та визначається такими положеннями:

– вперше:

а) визначено закономірності впливу геометричних параметрів фасонних елементів трубопровідних систем, напрямків руху ними двофазних потоків (для трійників) на траєкторії руху дисперсних фаз, що дало змогу визначити основні параметри, які впливають на процеси їх ерозійного зношування (місця вдарення дисперсних фаз у стінку, кути атаки, швидкість, діаметри дисперсних фаз у місці удару);

б) встановлено закономірності між місцезнаходженням, інтенсивністю ерозійного зношування фасонних елементів газопроводів і їх геометричними параметрами, режимними параметрами транспортування та характеристиками і концентрацією дисперсних фаз, що дозволило визначити місця обстежень фасонних елементів на ерозійне зношування, побудувати тривимірні геометричні моделі ерозійних дефектів;

в) встановлено закономірності впливу глибини ерозійних дефектів фасонних елементів трубопроводів на їх напружений стан, визначено зони потенційного ризику втрати міцності та допустиму глибину ерозійних дефектів, розроблено алгоритм 3D-моделювання фасонних елементів трубопроводів зі складною об'ємною геометричною формою їх ерозійних дефектів, що дає змогу оцінити працездатність таких елементів, визначити їх залишковий ресурс;

г) запропонована, науково обґрунтована та якісно підтверджена порівнянням із результатами чисельного моделювання розрахункова залежність для визначення

кільцевих напружень, які виникають у стінці ерозійно чи корозійно зношених відводів трубопроводів, що дозволило розробити покроковий алгоритм оцінювання їх міцності;

д) встановлено закономірності зміни тиску компресора під час протягування поршнем рукава трубопроводом, який містить ерозійно чи корозійно зношені відводи на основі яких розроблена технологія безтраншейної реконструкції складних трубопровідних систем;

– удосконалена методологія оцінювання енерговитратності фасонних елементів трубопроводів із урахуванням їх геометричних параметрів, режимних параметрів транспортування, характеристик дисперсних фаз та визначено залежність між цими параметрами та коефіцієнтами місцевих опорів, втратами тиску двофазних потоків у таких елементах;

– набуло подальшого розвитку вивчення закономірностей газогідродинамічних процесів у фасонних елементах трубопровідних систем, розширені наукові знання про турбулентні процеси, розподіл тиску, швидкості, кінетичної енергії турбулентності, об'ємних часток суцільної і дисперсної фази у їх внутрішній порожнині.

Сукупність одержаних наукових результатів складає наукові основи оцінювання енерговитратності та забезпечення працездатності складних трубопровідних систем.

Практичне значення одержаних результатів. Результати досліджень є корисними для проектування мінімально енерговитратних і стійких до ерозійного зношування складних трубопровідних систем та керування їх енерговитратністю. Також отримані результати дають змогу своєчасно визначити місцезнаходження, геометричні параметри та динаміку ерозійного зношування фасонних елементів трубопровідних систем, значно якісніше та ґрунтовніше їх обстежувати, підходити до оцінювання міцності, визначення періодичності обстеження, прогнозувати їх стан та визначати залишковий ресурс із метою планування ремонтних робіт.

Розроблено комплексну галузеву методику технічного діагностування та розрахунку міцності фасонних елементів трубопровідних систем, яку впроваджено в Науково-виробничому центрі технічної діагностики “Техдіагаз” АТ “Укртрансгаз” НАК “Нафтогаз України”. Також розроблено методику розрахунку напружено-деформованого стану балкових систем надземних переходів, яку впроваджено в ТОВ “ЕКСПРЕС-ГАЗБУД”.

Виконані в дисертаційній роботі теоретичні й експериментальні дослідження дали змогу розробити нову техніку та технологію безтраншейної реконструкції складних трубопровідних систем, які містять декілька дефектних відводів, рукавом чи гнучкими композитними трубами. Розроблена технологія промислово апробована та впроваджена у СП “Київські теплові мережі” КП “Київтеплоенерго” РТМ “Печерськ”. Основні розроблені положення щодо безтраншейного ремонту ерозійно чи корозійно зношених відводів трубопроводів гнучкими композитними трубами включені в національний стандарт України ДСТУ 9003:2020 “Технологія будівництва магістральних і промислових трубопроводів із гнучких композитних труб. Загальні технічні вимоги”.

Результати досліджень використовуються в навчальному процесі кафедри газонафтопроводів та газонафтосховищ Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу під час викладання дисциплін “Ремонт зосереджених об'єктів газонафтопроводів”, “Спорудження зосереджених об'єктів газонафтопроводів”, “Спорудження магістральних трубопроводів” для студентів спеціальності 185 – “Нафтогазова інженерія та технології”.

Особистий внесок здобувача. Всі 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:

– досліджено структуру однофазних потоків, закономірності газогідродинамічних процесів, втрат гідравлічної енергії у фасонних елементах трубопровідних систем [3, 19, 22, 35, 41, 44];

– досліджено залежність втрат енергії двофазних потоків у фасонних елементах трубопровідних систем від режимних параметрів транспортування, характеристик дисперсних фаз і геометричних параметрів досліджуваних елементів, визначено та досліджено траєкторії руху дисперсних фаз такими елементами [2, 6, 7, 14, 28, 42, 54];

– досліджено процеси ерозійного зношування фасонних елементів трубопровідних систем, встановлено закономірності між траєкторіями руху дисперсних фаз, геометричними параметрами елементів, режимними параметрами транспортування, характеристиками дисперсних фаз і місцезнаходженням та інтенсивністю ерозійного зношування досліджуваних елементів [1, 9, 20, 21, 23, 26, 36, 37, 43, 47];

– досліджено напружений стан фасонних елементів трубопроводів із урахуванням газодинамічних процесів у їх внутрішній порожнині, температурного перепаду в стінках та ерозійних дефектів складної геометричної форми. Встановлено закономірності впливу глибини ерозійних дефектів на напружено-деформований стан фасонних елементів [1, 4, 18, 30, 31, 34, 47–52];

– встановлено закономірності зміни тиску під час протягування поршнем рукава трубопроводом, який містить ерозійно чи корозійно зношений відвід; розроблено технологію ремонту дефектних відводів складних трубопровідних систем [5, 15–17, 24, 25, 27, 29, 32, 33, 38–40, 45, 46, 51, 53].

У наукових працях, опублікованих у співавторстві, дисертанту належить фактичний матеріал і основний творчий доробок. Автор виконав планування та всі експериментальні дослідження, здійснив аналіз їх результатів, брав безпосередню участь у промисловій апробації та впровадженні результатів дисертаційної роботи у виробництво. Всі 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-технічній конференції “Проблеми і перспективи транспортування нафти і газу” (м. Івано-Франківськ, 15–18 травня 2012 р.); одинадцятій Міжнародній навчально-науковій-практичній конференції “Трубопровідний транспорт – 2016” (м. Уфа, 24–25 травня 2016 р.); шістнадцятій Всеукраїнській науково-технічній конференції

“Актуальні проблеми енергетики та екології” (м. Одеса, 5–8 жовтня 2016 р.); восьмій Всеукраїнській практично-пізнавальній конференції “Наукова думка сучасності і майбутнього” (м. Дніпро, 30 січня – 7 лютого 2017 р.); шостій Міжнародній науково-технічній конференції “Нафтогазова енергетика–2017” (м. Івано-Франківськ, 15–19 травня 2017 р.); двадцять дев’яतій науковій сесії наукового товариства ім. Шевченка (м. Львів, 31 березня 2018 р.); шостій Міжнародній науковій конференції “Науковий прогрес у європейських країнах: нові концепції та сучасні рішення” (м. Штутгарт, 19 квітня 2019 р.); Міжнародній науково-технічній конференції “Нафтогазова енергетика” (м. Івано-Франківськ, 27–31 травня 2019 р.); Міжнародній науково-технічній конференції “Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи його діагностування і прогнозування” (м. Тернопіль, 24–27 вересня 2019 р.); п’ятій Міжнародній науково-практичній конференції “Актуальні питання розвитку сучасної науки” (м. Софія, 15–17 січня 2020 р.); Міжнародній науково-практичній конференції “Теоретичні та практичні аспекти розвитку науки та освіти” (м. Львів, 22–23 січня 2020 р.); Міжнародній науково-технічній конференції імені професора Михальова О. І. “Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні ІТММ’2020” (м. Дніпро, 17–19 березня 2020 р.).

Результати дисертаційної роботи в повному обсязі доповідались на науковому семінарі кафедри газонафтопроводів та газонафтосховищ і міжкафедральному науковому семінарі Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу в 2020 році.

Публікації. За темою дисертаційної роботи опубліковано 45 друкованих праць, із яких: 6 – у міжнародних наукових журналах, що індексуються у наукометричних базах даних Scopus, Web of Science; 1 – розділ у колективній монографії, опублікованій у зарубіжному виданні; 24 – у наукових фахових виданнях; 2 – патенти на корисну модель; 12 – у збірниках матеріалів і тез доповідей на міжнародних і всеукраїнських конференціях.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота містить вступ, шість розділів, загальні висновки, список використаних джерел та чотири додатки. Роботу викладено на 405 сторінках машинописного тексту, обсяг основного тексту дисертації складає 300 сторінок. Роботу проілюстровано 139 рисунками та 10 таблицями. Список використаних джерел містить 322 найменування, із яких 161 кирилицею та 161 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 сучасних підходів та результатів досліджень щодо забезпечення ефективності функціонування та безаварійності складних трубопровідних систем”* виконано аналіз підходів і результатів досліджень динаміки руху однофазних, багатofазних потоків фасонними елементами трубопровідних систем; втрат у них гідравлічної енергії; структури потоків у цих елементах. Проаналізовано існуючі механізми та моделі ерозійного зношування стінки фасонних елементів трубопроводів, розглянуто результати досліджень процесів ерозійного зношування таких елементів. Виконано аналіз результатів дослідження напружено-деформованого стану фасонних елементів трубопровідних систем та напружено-деформованого стану таких елементів із різноманітними дефектами стінки.

Теоретичні основи проектування складних трубопровідних систем із урахуванням втрат гідравлічної енергії в фасонних елементах заклали Альтшуль А. Д., Бобровський С. А., Галіуллін З. Т., Гончарук М. І., Грудз В. Я., Євдокімов А. Г., Ідельчик І. Е., Капцов І. І., Середюк М. Д., Сухарев М. Г.

Дослідженнями динаміки руху багатofазних потоків газопроводами газовидобувного комплексу, розробленням моделей режимів роботи таких газопроводів займалися Братах М. І., Гусейнов І. С., Райтер П. М., Стецюк С. М.

Розробленням, удосконаленням методів контролю наявності забруднень у трубопроводах, ультразвуковим дослідженням інтенсивності ерозійного зношування фасонних елементів, дослідженнями їх напружено-деформованого стану займалися Карпаш О. М., Лінчевський М. П., Олійник А. П., Шлапак Л. С., Юхимець П. С.

На основі аналізу літературних джерел визначено, що практично всі аналітичні, чисельні або експериментальні дослідження стосуються окремих процесів, які відбуваються в фасонних елементах трубопровідних систем – чи то газодинамічних, чи ерозійного зношування або напружено-деформованого стану. Синергію цих процесів, поєднання їх у єдину цілісну фізичну картину на сьогодні не здійснено. Відсутня методика оцінювання працездатності ерозійно зношених фасонних елементів трубопровідних систем, яка б одночасно враховувала усі ці процеси. В багатьох випадках відсутні достатньо виразні фізичні уявлення про закономірності газодинамічних процесів, які відбуваються у фасонних елементах трубопровідних систем, їх вплив на стінку відповідно, основні рівняння, які б описали ці процеси, отримати неможливо. Тому для вирішення таких задач – як частково, так і у комплексі (мультидисциплінарне моделювання) – було вибрано чисельне моделювання в сучасних програмних комплексах.

На сьогодні в літературних джерелах чисельних досліджень однофазних, багатофазних потоків у фасонних елементах трубопровідних систем, їх ерозійного зношування, напружено-деформованого стану надзвичайно мало, і, в основному, вони стосуються водопроводів і пневмопроводів малих діаметрів. Геометрична 3D форма корозійних, ерозійних дефектів у чисельних дослідженнях напружено-деформованого стану фасонних елементів надзвичайно спрощена (ідеалізована до сферичної чи прямокутної) і не відповідає реальній геометричній формі таких дефектів. Переважна більшість досліджень зосереджена на розмірі дефекту спрощеної геометричної форми, а місце дефекту не змінювалось.

Що ж до трійників трубопровідних систем, то переважна більшість досліджень виконаних, різними методами, в основному, стосується розділення та злиття потоків у трійниках. Такі результати не є повними, оскільки не охоплюють усі можливі комбінації напрямків руху потоку у трійниках, які зустрічаються у різноманітних трубопровідних системах, зокрема газонафтопровідних. Для неохоплених комбінацій напрямків руху потоку в трійниках не встановлено вплив геометрії трійників на гідрогазодинамічні процеси, втрати в них гідравлічної енергії, ерозійне зношування та напружено-деформований стан.

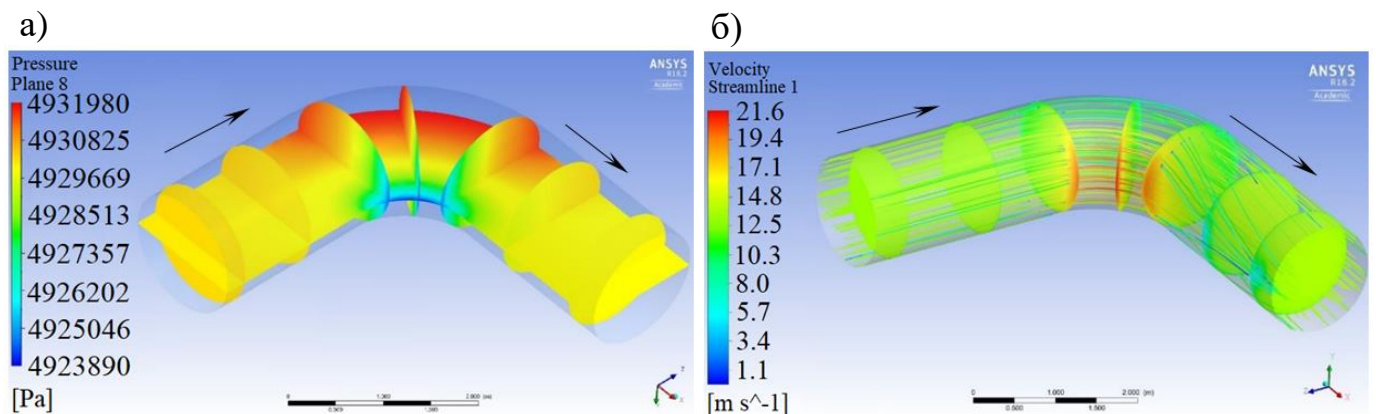
Дослідження руху однофазних, багатофазних потоків елементами трубопровідних систем складної геометричної форми, втрат у них гідравлічної енергії, ерозійного зношування, напружено-деформованого стану є багатосторонньою та надзвичайно складною задачею. Більшість із цих процесів важко розрахувати теоретично, а в умовах реальних трубопроводів, особливо магістральних, багато параметрів процесів неможливо визначити експериментально. Порівняно з однофазними потоками рівняння для визначення втрат гідравлічної енергії двофазних потоків в фасонних елементах трубопровідних систем в літературних джерелах надзвичайно складні, є наближеними через прийнятий ряд припущень, не враховують структури двофазних потоків, нерівномірний розподіл фаз тощо. Місця обстежень фасонних елементів трубопроводів із ґрунтовним аналізом впливу газодинамічних процесів у їх внутрішній порожнині на ерозійне зношування не передбачені жодним українським нормативним документом, і фахівці, які виконують обстеження, визначають їх на основі нічим не обґрунтованих логічних міркувань, набутого досвіду. Тому проблема ерозійного зношування фасонних елементів трубопроводів є практично не вивченою, немає повного розуміння цього процесу і залишається багато питань, вирішення яких дало б можливість більш ґрунтовно виконувати обстеження таких елементів.

На основі аналізу літературних джерел сформовані завдання дисертаційної роботи. Першочерговими є комплексне дослідження закономірностей руху однофазних та багатофазних потоків фасонними елементами трубопроводів, закономірностей втрат гідравлічної енергії потоку в їхній внутрішній порожнині; визначення та вивчення траєкторії руху дисперсних фаз, виявлення місць інтенсивного ударяння дисперсних фаз у стінку трубопроводу, визначення кутів атаки в місці ударяння; визначення місць ерозійного зношування фасонних елементів і розрахунок швидкості ерозійного зношування; визначення напружено-деформованого стану фасонних елементів, напружено-деформованого стану фасонних елементів із дефектами зі складною геометричною формою.

У другому розділі “Дослідження газодинаміки однофазних потоків у фасонних елементах трубопровідних систем” визначено закономірності впливу геометричних параметрів фасонних елементів трубопровідних систем, напрямків руху ними потоків (для трійників), режимних параметрів транспортування на газодинамічні процеси, структуру однофазного потоку, втрати гідравлічної енергії у їх внутрішній порожнині.

Методом досліджень було вибрано CFD моделювання. Дослідження здійснювались шляхом чисельного розв’язання рівнянь Нав’є-Стокса і неперервності потоку замкнених двопараметричною $k-\varepsilon$ або SST моделлю турбулентності з застосуванням пристінної функції з відповідними початковими та граничними умовами.

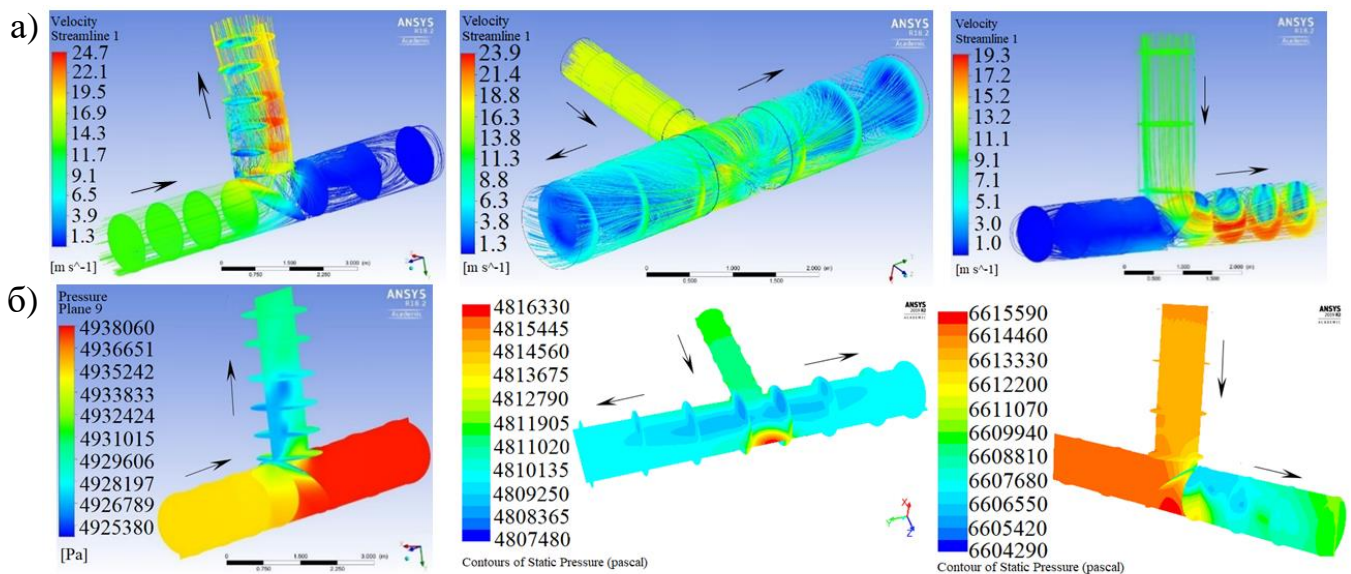
У відводах трубопроводів зміна напрямку руху потоку призводить до перебудови його структури як у повздовжньому, так і в поперечних перерізах, виникнення поперечного градієнту тиску (рис. 1, а) і швидкості потоку (рис. 1, б). Структура потоку в відводах трубопровідних систем визначається збільшенням тиску в напрямі від ввігнутого до опуклого боку відводу. Відбувається зниження тиску біля ввігнутого боку відводу та підвищення тиску біля опуклого боку. Такий нерівномірний розподіл тиску чинить вплив на напружений стан відводу.



а) – поля тиску в площинах горизонтального повздовжнього та поперечних перерізів; б) – лінії течії та поля швидкостей у поперечних перерізах

Рисунок 1 – Результати моделювань динаміки руху потоку відводом газопроводу з кутом вигину 90°

Газодинамічні процеси, розподіл швидкості, тиску у внутрішній порожнині трійників трубопровідних систем суттєво залежать від напрямків руху потоку трійниками (рис. 2). Визначено закономірності впливу напрямків руху потоку трійниками на структуру потоку в їх внутрішній порожнині. Виявлено місця виникнення конфузорних і дифузорних ефектів, вихорів, рециркуляцій, “застійного склепіння”, відривання потоку від стінки трійників. Найбільше локальне підвищення тиску в трійниках спостерігалось тоді коли потік рухався відгалуженням трійника і з відгалуження розходився у дві сторони магістралі трійника.



а) лінії течії та поля швидкостей у поперечних перерізах; б) – поля тиску в площинах горизонтального повздовжнього та поперечних перерізів

Рисунок 2 – Результати моделювань динаміки руху потоку трійниками газопроводу

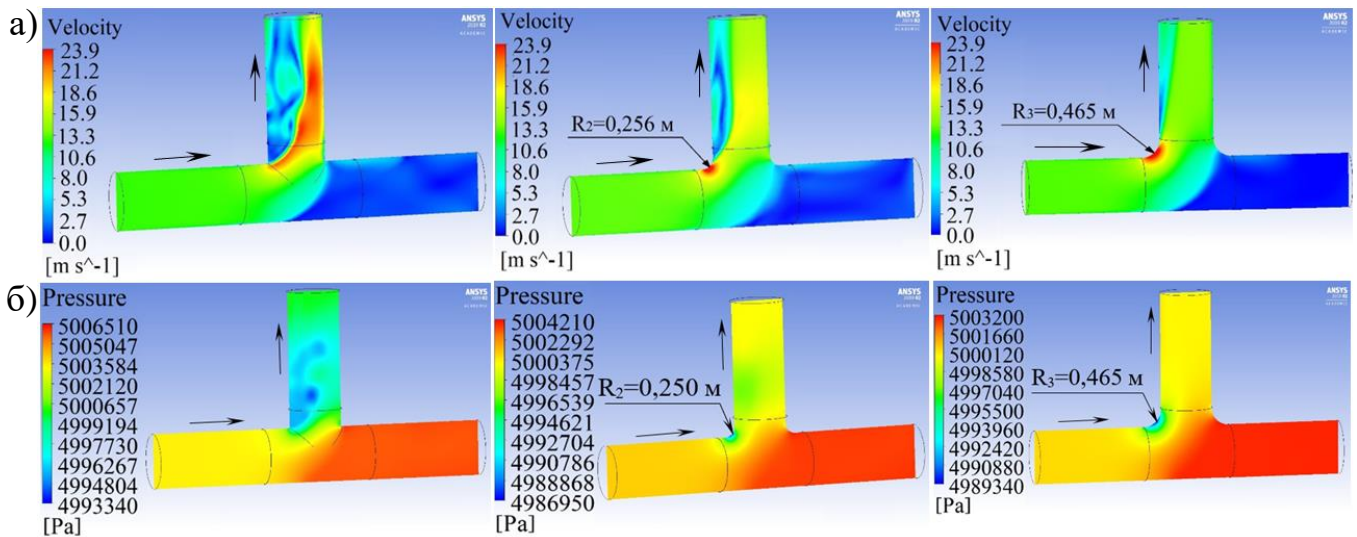
Досліджено вплив геометричних параметрів трійників на газодинамічні процеси в їх внутрішній порожнині, втрати гідравлічної енергії. Для цього було вибрано зварні та штамповані трійники. Радіус відбортування штампованих трійників змінювався від мінімально до максимально можливого. Відбортування трійників, збільшення радіуса відбортування призводить до зменшення максимуму швидкості потоку в відгалуженні трійника, послаблення інтенсивності відривання потоку в місці відбортування, зменшення зони й інтенсивності рециркуляції в відгалуженні трійника (рис. 3, а). Усі ці процеси зумовлюють суттєве зменшення втрати тиску зі збільшенням радіуса відбортування (рис. 3, б), а отже, зменшення втрат гідравлічної енергії потоку. За визначеними з поля тиску (рис. 3, б) значеннями падінням тиску в кожному трійнику розраховано коефіцієнти місцевого опору та втрати напору (енергії) у рівнопрохідних трійниках різного діаметра із різними радіусами відбортування, які були основними критеріями оцінювання величини втрат гідравлічної енергії. На основі отриманих закономірностей встановлено, що найменш енерговитратними є трійники в яких відношення радіуса відбортування до діаметра рівнопрохідного трійника перевищує 0,25. Якщо це відношення менше 0,25, то коефіцієнт місцевого опору таких трійників починає різко зростати (рис. 4).

Виведено залежність для розрахунку коефіцієнтів місцевого опору рівнопрохідних трійників, у яких потік із магістралі повністю перетікає у відгалуження

$$\xi = 1,58e^{-7,7 \frac{R_m}{D_{3.m}}}, \quad (1)$$

де R_m – радіус відбортування трійника; $D_{3.m}$ – зовнішній діаметр трійника.

Визначено закономірності втрат напору (енергії) в рівнопрохідних трійниках різних діаметрів із різним радіусом відбортування при різних значеннях тиску в місці розміщення трійника. Найбільші втрати енергії спостерігались у трійниках,



а) – поля швидкості в повздовжніх перерізах; б) – поля тиску в повздовжніх перерізах

Рисунок 3 – Залежність структури потоку від радіуса відбортування трійника

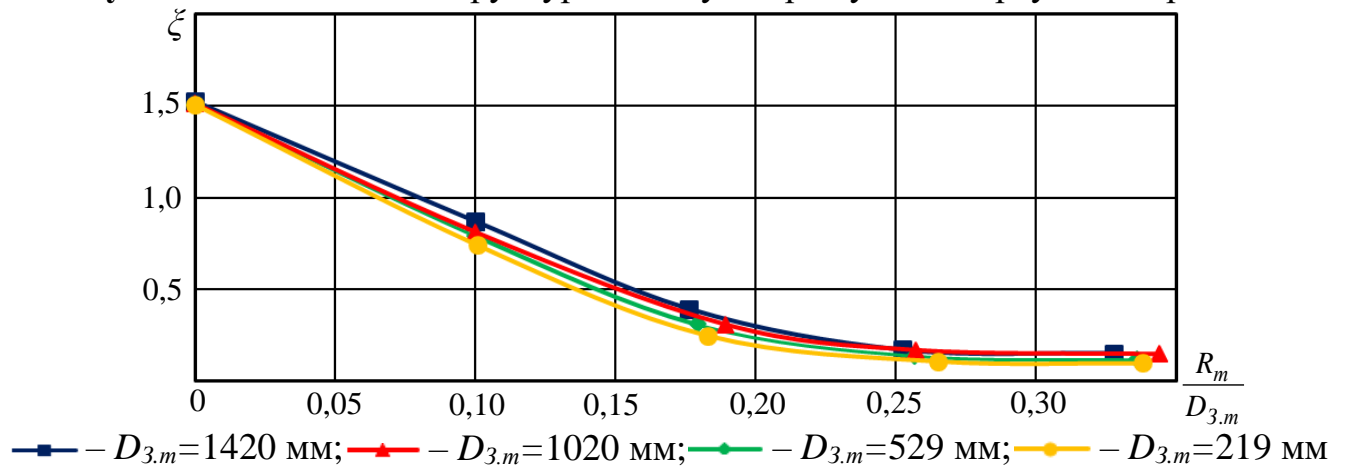
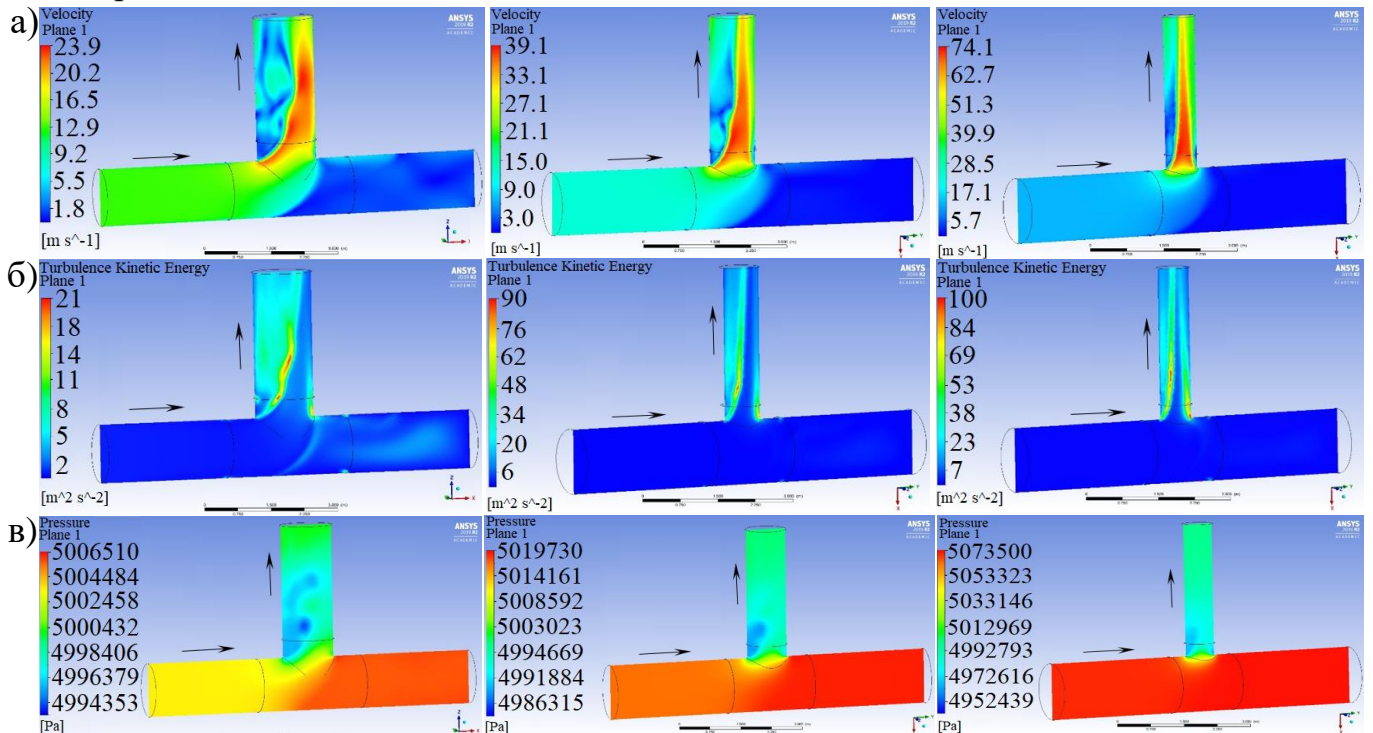


Рисунок 4 – Залежність коефіцієнта місцевого опору рівнопрохідних трійників ξ в яких потік із магістралі повністю перетікає у відгалуження, від відношення радіуса відбортування R_m до зовнішнього діаметра трійника $D_{3,m}$

розміщених у місцях найменших тисків у трубопровідній системі. Це є негативним, оскільки багато і магістральних, і промислових газопроводів сьогодні працюють в умовах, коли робочий тиск значно менший, ніж проектний. При цьому найсуттєвіші втрати енергії спостерігались у штампованих трійниках із малим радіусом відбортування та зварних трійниках. Чим менший діаметр рівнопрохідного трійника, тим більший вплив збільшення радіуса його відбортування (до максимально можливого) чинить на енерговитратність трійника. Відбортування рівнопрохідних трійників діаметром 1420 мм, збільшення радіуса їх відбортування до максимально можливого зумовлює зменшення втрат у них гідравлічного напору в 10 разів, а у трійниках діаметром 219 мм – 15 разів.

Газодинамічні процеси у зварних трійниках істотно залежать від діаметра відгалуження трійника. Зі зменшенням діаметра відгалуження трійника максимум швидкості у відгалуженні зміщується від набігаючої стінки до осі відгалуження (рис. 5, а), а інтенсивність турбулентних процесів, рециркуляції з зменшенням

діаметра відгалуження посилюються не лише з боку відгалуження трійника, де відбувається відривання потоку від стінки, але й з боку набігаючої стінки відгалуження (рис. 5, б). Все це є причиною значного збільшення енерговитратності трійників, зі зменшенням діаметра їх відгалуження. Так, втрати тиску в зварному нерівнопрохідному трійнику з діаметром відгалуження 720 мм і діаметром магістралі 1420 мм у 15 разів більші, ніж у зварному рівнопрохідному трійнику діаметром 1420 мм.



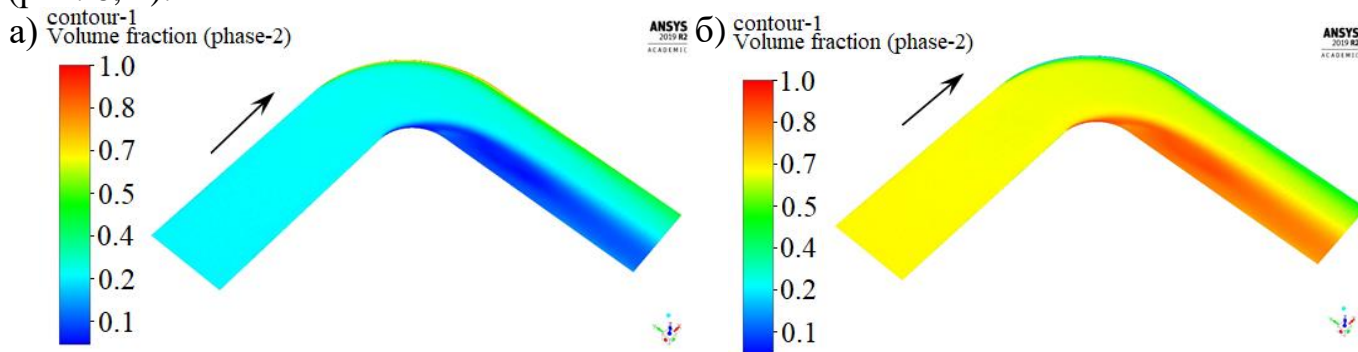
а) – поля швидкості в повздовжніх перерізах; б) – поля кінетичної енергії турбулентності в повздовжніх перерізах; в) – поля тиску в повздовжніх перерізах
Рисунок 5 – Залежність структури потоку від діаметра відгалуження трійника

У третьому розділі “Дослідження руху багатофазних потоків фасонними елементами трубопровідних систем” визначено закономірності впливу геометричних параметрів фасонних елементів трубопровідних систем, експлуатаційних параметрів транспортування та характеристик дисперсних фаз, їх об’ємної частки на втрати гідравлічної енергії двофазних потоків, траєкторії руху дисперсних фаз такими елементами. Отримано емпіричні залежності, які дають змогу визначити втрати тиску двофазних потоків у фасонних елементах газопроводів.

Закономірності втрати гідравлічної енергії багатофазних потоків в фасонних елементах трубопровідних систем визначались Ейлеровим підходом. Було вибрано модель багатофазової суміші Mixture, що дозволяє розраховувати дві або більше фаз, які вважаються взаємопроникними континуумами. Багатофазний потік у фасонних елементах трубопровідних систем моделювався розв’язанням рівняння неперервності для суміші, збереження імпульсу й енергії суміші, рівняння об’ємної частки для дисперсних фаз і алгебраїчного виразу відносних швидкостей фаз.

У фасонних елементах трубопровідних систем унаслідок зміни напрямку руху потоку відбувається нерівномірний перерозподіл фаз, через різну їхню густину.

Дисперсна фаза у відводах трубопроводів починає зміщуватись від ввігнутого боку відводу до опуклого (рис. 6, а). У місці виходу газового потоку з відводу і в прилеглий до нього трубці дисперсна фаза, в основному, концентрована в частині труби з опуклого боку відводу. Розподіл об'ємної частки суцільної фази є протилежним до дисперсної, і вона більше концентрована з ввігнутого боку відводу (рис. 6, б).



а) – дисперсна фаза; б) – суцільна фаза

Рисунок 6 – Поля об'ємних часток фаз у відводі трубопроводу з кутом вигину 90°

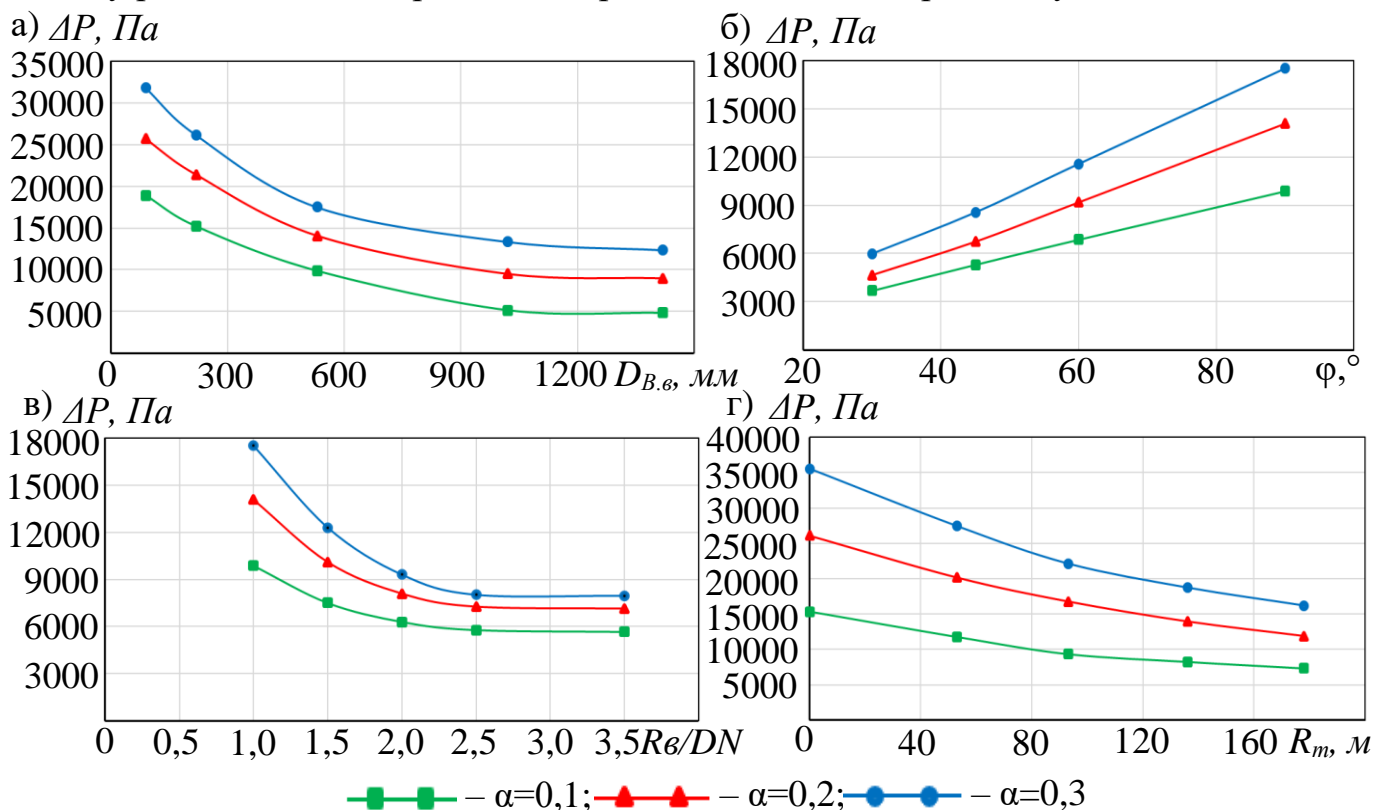
Зміна напрямку руху двофазного потоку в фасонних елементах трубопроводних систем призводить до нерівномірного перерозподілу тиску. В відводі спостерігався радіальний градієнт тиску, зумовлений відцентровою силою, що діє на двофазний потік. Зі збільшенням об'ємної частки дисперсної фази втрати тиску в відводах збільшувались. Із полів розподілу тиску в відводах визначались втрати тиску в цих елементах, які були основним критерієм втрат гідравлічної енергії двофазного потоку в фасонних елементах. Визначались закономірності впливу геометричних параметрів відводів, режимних параметрів транспортування, характеристик дисперсних фаз, об'ємних часток дисперсної фази (приймались рівними 0,1, 0,2 і 0,3) на втрати тиску двофазних потоків у внутрішній порожнині відводів.

Втрати тиску в відводі збільшується зі зменшенням його діаметра (рис. 7, а), збільшенням кута вигину (рис. 7, б) і зменшенням радіуса вигину (рис. 7, в) для всіх об'ємних часток дисперсної фази. В усіх випадках: чим більша об'ємна частка дисперсної фази, тим більші втрати тиску в відводі для одного й того ж значення досліджуваного параметра. Найінтенсивніше втрати тиску у відводах збільшуються, якщо діаметр відводу був менший 500 мм (рис. 7, а), а радіус вигину відводу більший $2,5 \cdot DN$ (DN – умовний діаметр відводу) (рис. 7, в). Також втрати тиску в відводах зростають при великих швидкостях багатofазного потоку та малих тисках у місці розміщенні відводу.

В трійниках найсуттєвіший вплив об'ємної частки дисперсної рідкої фази на втрати тиску спостерігався тоді, коли радіус відбортування трійника був найменший або відбортування було взагалі відсутнє (зварні трійники) (рис. 7, г).

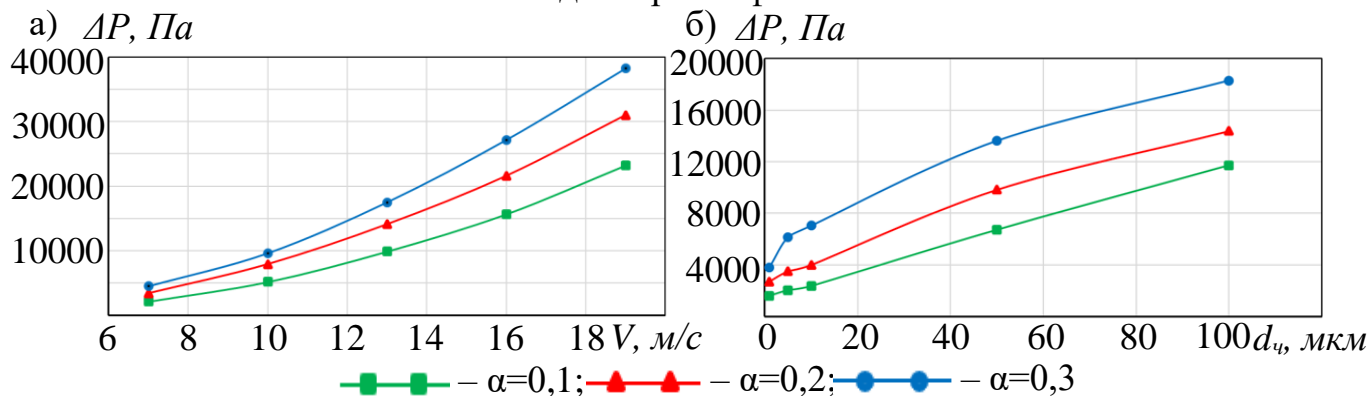
Зі збільшенням швидкості двофазного потоку значно збільшується втрати тиску в внутрішній порожнині відводів трубопроводів (рис. 8, а). Така закономірність залишаються незмінною для всіх об'ємних часток дисперсної фази. В зоні малих швидкостей об'ємна частка дисперсної фази має менший вплив, ніж у

зоні великих. У міру збільшення діаметра дисперсних частинок їх вплив на втрати тиску в відводах трубопроводів збільшується (рис. 8, б). Така закономірність зберігається для усіх об'ємних часток дисперсної фази. Тільки в зоні малих діаметрів дисперсних частинок при об'ємній частці дисперсної фази, на вході відводу рівній 0,3, спостерігається стрімке збільшення втрат тиску.



а) – внутрішнього діаметра відводу; б) – кута вигину відводу; в) – радіуса вигину відводу; г) – радіуса відбортування трійника

Рисунок 7 – Залежність втрат тиску двофазного потоку в фасонних елементах трубопроводних систем від їх геометричних параметрів для різних об'ємних часток дисперсної фази



а) – швидкості двофазного потоку на вході у відвід; б) – діаметра дисперсних частинок

Рисунок 8 – Залежність втрат тиску двофазного потоку в відводах трубопроводних систем від експлуатаційних параметрів транспортування та характеристик дисперсних фаз для різних об'ємних часток дисперсної фази

За отриманими результатами виведено емпіричні залежності для розрахунку втрати тиску двофазних потоків у фасонних елементах газопроводів, яка враховує їх геометричні параметри, експлуатаційні параметри транспортування та діаметри дисперсних фаз, їх об'ємну частку. Втрати тиску двофазних потоків у внутрішній порожнині відводів газопроводів рівні

$$\Delta P = \frac{K\varphi\rho_2\alpha V^2}{D_n^{0,05}} \sqrt{\frac{d_q}{R_g}}, \quad (2)$$

де K – коефіцієнт, який залежить від геометричної форми фасонного елемента (для відводів $K = 1,6 \cdot 10^3$, а для трійників $K = 5,8 \cdot 10^5$); φ – кут вигину відводу; ρ_2 – густина газу; α – об'ємна частка дисперсної фази; V – швидкості двофазного потоку на вході у відвід; d_q – діаметр дисперсних частинок; D_n – число Діна; R_g – радіус вигину відводу.

Число Діна рівне

$$Dn = \frac{V}{v_2} \sqrt{\frac{D_{B.g}^3}{2R_g}}, \quad (3)$$

де $D_{B.g}$ – внутрішній діаметр відводу; v_2 – кінематична в'язкість газу.

Втрати тиску двофазних потоків у трійниках, в яких потік із магістралі повністю перетікає у відгалуження рівні

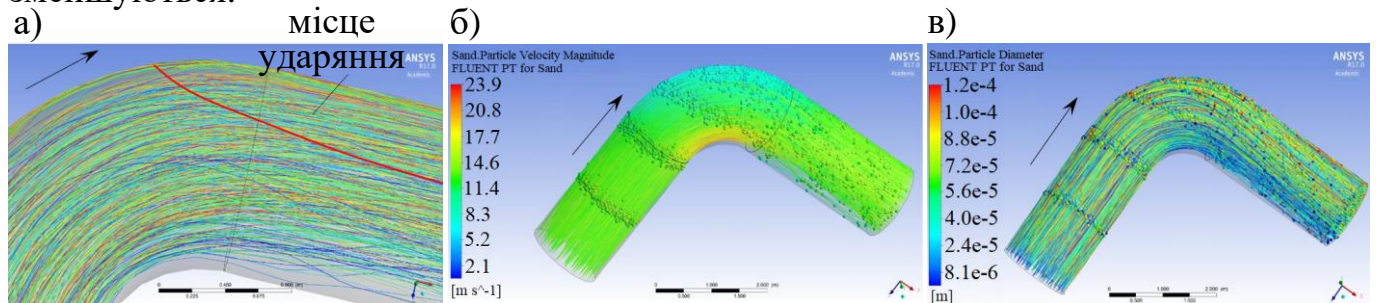
$$\Delta P = K\rho_2\alpha V^2 \sqrt{\frac{d_q}{R_m}}, \quad (4)$$

де R_m – радіус відбортування трійника.

Для визначення траєкторій руху дисперсних фаз у суцільній фазі внутрішньою порожниною фасонних елементів трубопровідних систем було вибрано Лагранжевий підхід (модель Discrete Phase Model). В основі такого підходу лежить розгляд руху окремих частинок дисперсної фази в потоці фази суцільної. Для цього до системи рівнянь Нав'є-Стокса, неперервності додається диференціальне рівняння руху частинок, яке враховує всі сили, що діють на частинку з боку суцільної фази. Такий підхід дає можливість побудувати траєкторії руху частинок дисперсної фази в потоці суцільної фази фасонними елементами трубопровідних систем.

У досліджуваних відводах газопроводів більша частина крапель конденсату та твердих частинок (до 60 %) рухається потоком суцільної фази з наближенням до стінки опуклого боку відводу і не вдаряється в неї. Менша частина крапель конденсату і твердих частинок рухається відводом траєкторіями, радіус яких більший за радіус вигину відводу; в результаті чого дисперсні фази ударяються в стінку відводу та привареної до нього труби (рис. 9, а). Найінтенсивніше дисперсні фази ударяються в стінку в місці закінчення відводу з опуклого його боку і на початку привареної до відводу труби. При цьому, чим більша віддаль від повороту відводу, тим кут атаки є меншим. Так, у кінці відводу він наближено рівний 40° , а вздовж привареної до відводу труби поступово зменшується. Дисперсні фази у відводі вздовж ввігнутого його боку пришвидшуються, а вздовж опуклого – вповільнюються (рис. 9, б). Більша частина крапель конденсату і твердих частинок,

які мають більші діаметри, рухаються з опуклого боку відводу, і частина з них ударяється в стінку відводу та привареної до відводу труби, що призводить до ерозійного зношування. Більша частина дисперсної фази меншого діаметра рухається з ввігнутого боку відводу (рис. 9, в). Зі зменшенням кута вигину відводу кількість дисперсних частинок, які вдаряються в стінку відводу, кут атаки дисперсних частинок у місці, де вони вдаряються в стінку, їх швидкість зменшуються.



а) – траєкторії руху дисперсної фази; б) – траєкторії руху дисперсної фази забарвлені в кольори, що відповідають швидкості; в) – траєкторії руху дисперсної фази забарвлені в кольори, що відповідають діаметру

Рисунок 9 – Результати моделювання руху дисперсної фази відводом трубопроводу з кутом вигину 90°

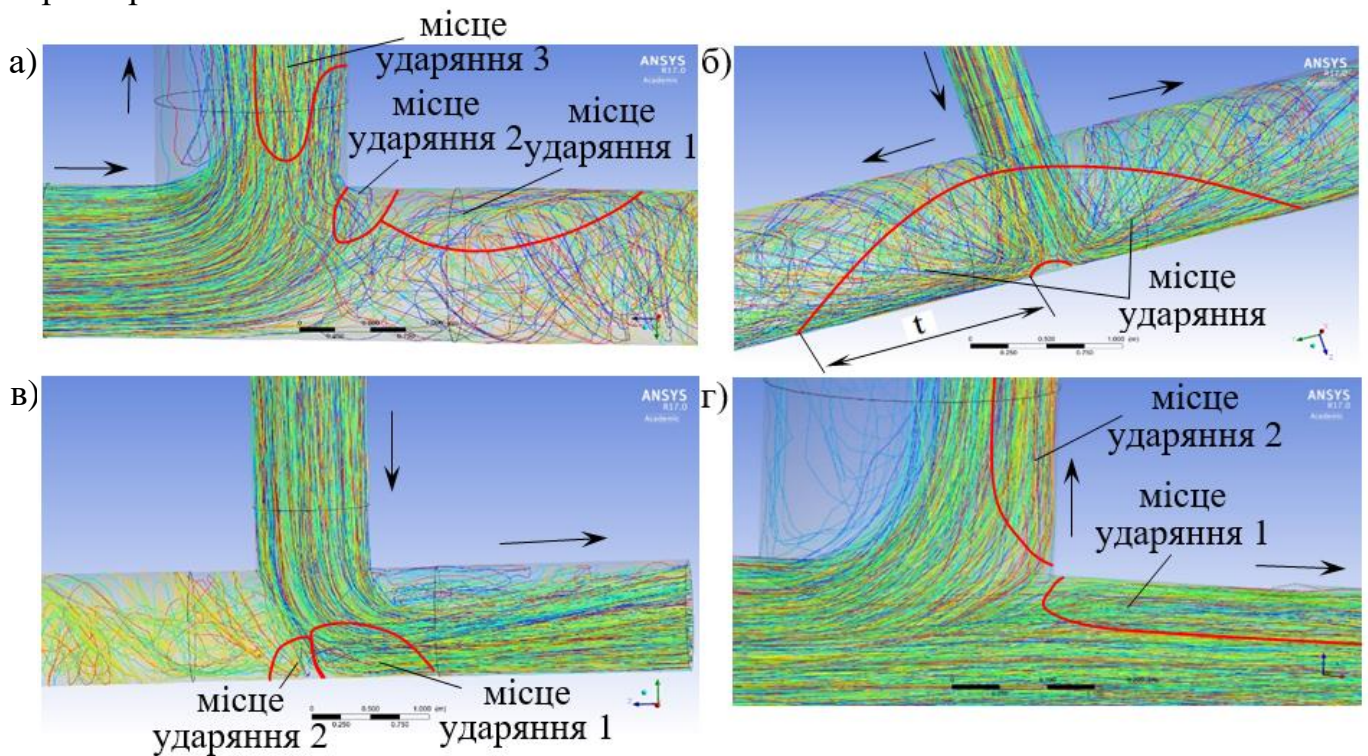
Визначено закономірності впливу напрямків руху потоків трійниками трубопроводних систем на розподіл дисперсних фаз у їх внутрішній порожнині за діаметрами, розподіл швидкостей дисперсних фаз, місця вдаряння дисперсних фаз у стінку (рис. 10), кути атаки в місці вдаряння. В трійниках, в яких потік рухається магістраллю і з магістралі повністю або частково перетікає у відгалуження, дисперсні фази вдаряються в стінку магістралі трійника відразу за відгалуженням, у яке перетікає потік, та в стінку відгалуження і привареної до нього труби в місці набігання на них потоку (рис. 10, а, г).

В трійниках, в яких потік рухається відгалуженням і з відгалуження розходить у дві сторони магістралі, дисперсні фази вдаряються в стінку магістралі трійника навпроти відгалуження, а місце вдаряння має форму кільця, викривленого внутрішньою стінкою магістралі (рис. 10, б). У трійниках, в яких потік рухається відгалуженням і з відгалуження перетікає в одну сторону магістралі, дисперсні фази вдаряються в стінку магістралі трійника навпроти відгалуження, а місце ударяння має грушоподібну форму, витягнуту в напрямку руху потоку магістраллю трійника.

У четвертому розділі “Дослідження процесів ерозійного зношування складних трубопроводних систем” визначено закономірності впливу траєкторій руху дисперсних фаз, швидкості та діаметра дисперсних фаз, кутів атаки, геометричних параметрів фасонних елементів трубопроводів на місцезнаходження та інтенсивність їх ерозійного зношування. Отримано емпіричну залежність між інтенсивністю ерозійного зношування відводів трубопроводів та основними параметрами процесу.

Для моделювання ерозійного зношування фасонних елементів трубопроводних систем було застосовано Лагранжевий підхід, модель Фінні. Модель Фінні аналізує траєкторію рух кожної дисперсної частинки в місці, де вона вдаряється в стінку

фасонного елемента, враховує характеристики частинок, їх швидкість, характеристики стінки.

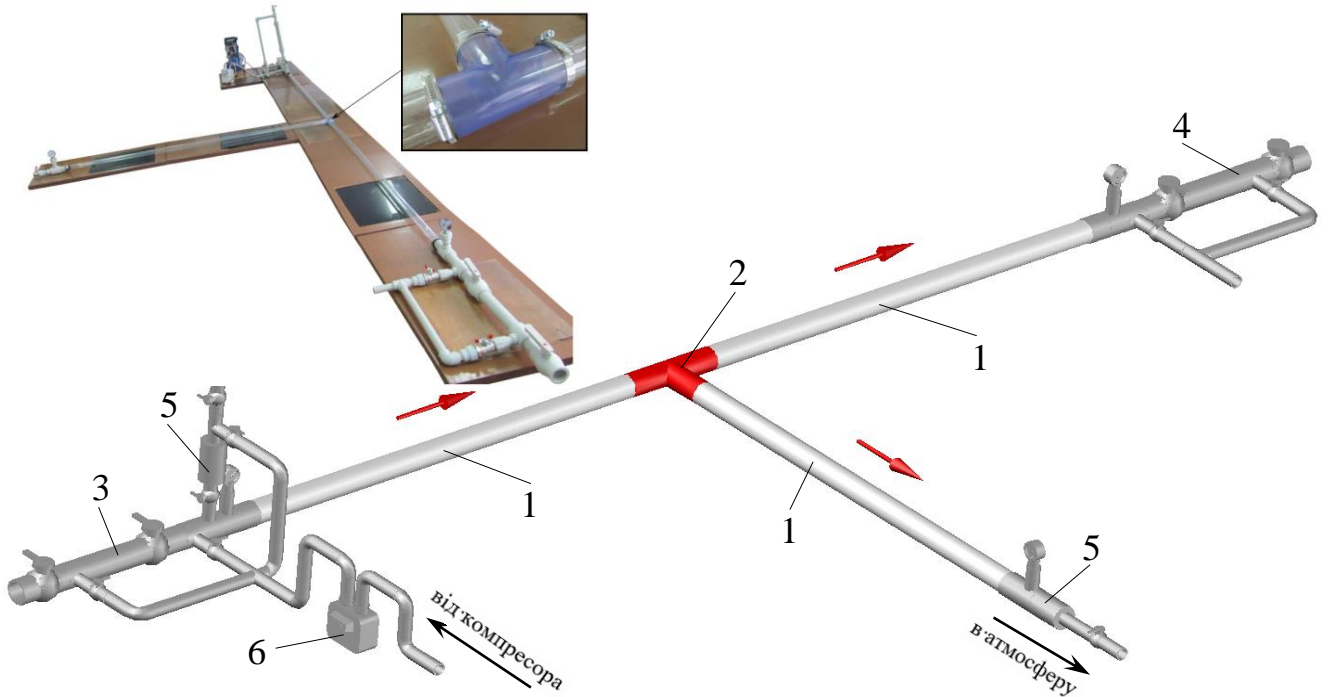


- а) – потік рухається магістраллю і з магістралі повністю перетікає в відгалуження;
 б) – потік рухається відгалуженням і з відгалуження розходить в дві сторони магістралі;
 в) – потік рухається відгалуженням і з відгалуження перетікає в одну сторону магістралі;
 г) – потік рухається магістраллю і з магістралі частково перетікає у відгалуження

Рисунок 10 – Траєкторії руху дисперсної фази трійниками

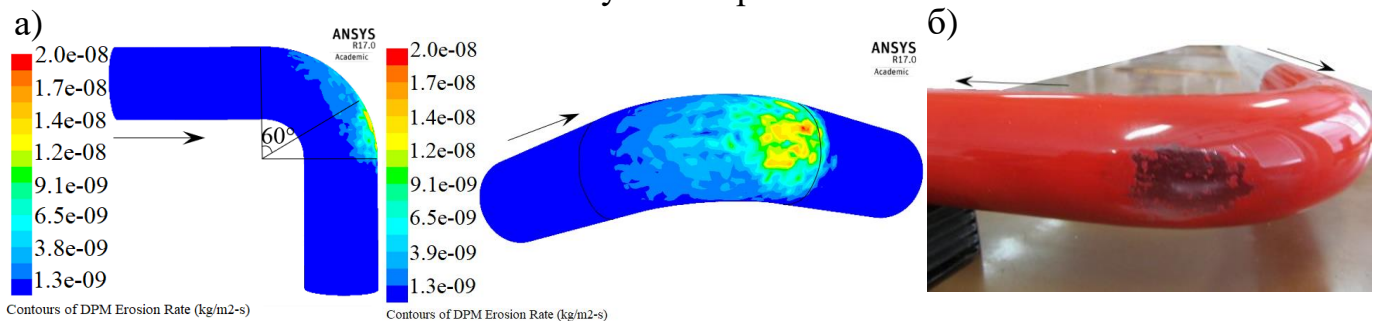
Також ерозійне зношування фасонних елементів трубопроводів було досліджено експериментально. Для цього було розроблено та побудовано багатофункціональний експериментальний стенд, який складається з вузла запускання дисперсних фаз у трубопровід, вузлів випускання двофазного потоку з трубопроводу (рис. 11). Вузли з'єднувались один із одним прозорими скляними трубами, між якими розміщено скляні прозорі фітинги. Для виявлення місць ерозійного зношування внутрішня поверхня фасонних елементів фарбувалась трьома шарами червоної фарби. Місце інтенсивного ерозійного зношування фасонних елементів визначалось шляхом виявлення місць їх внутрішньої поверхні з видаленою двофазним потоком фарбою.

Чисельним моделюванням та експериментально визначено, що ерозійне зношування відводів трубопроводів діаметром 1420 мм відбувається з опуклого їх боку в місці виходу потоку між кутом 60° і 90° відводу та на початку привареної до відводу труби (рис. 12). Визначено, що зі зменшенням діаметра відводу відбувається поширення поля максимального ерозійного зношування все більше на приварену до відводу трубу. Для діаметра відводу 89 мм його довжина на привареній до відводу трубі настільки ж велика, як і на відводі. Зі зменшенням кута вигину відводу поле



1 – скляна труба; 2 – прозорий пластиковий трійник; 3 – вузол запускання внутрішньотрубних засобів та дисперсних фаз у трубопровід; 4 – вузол приймання внутрішньотрубних засобів та випускання двофазного потоку з трубопроводу; 5 – вузол випускання двофазного потоку з трубопроводу; 5 – ємність для твердої та рідкої фази; 6 – газовий лічильник

Рисунок 11 – Експериментальний стенд для досліджень процесів ерозійного зношування трійника



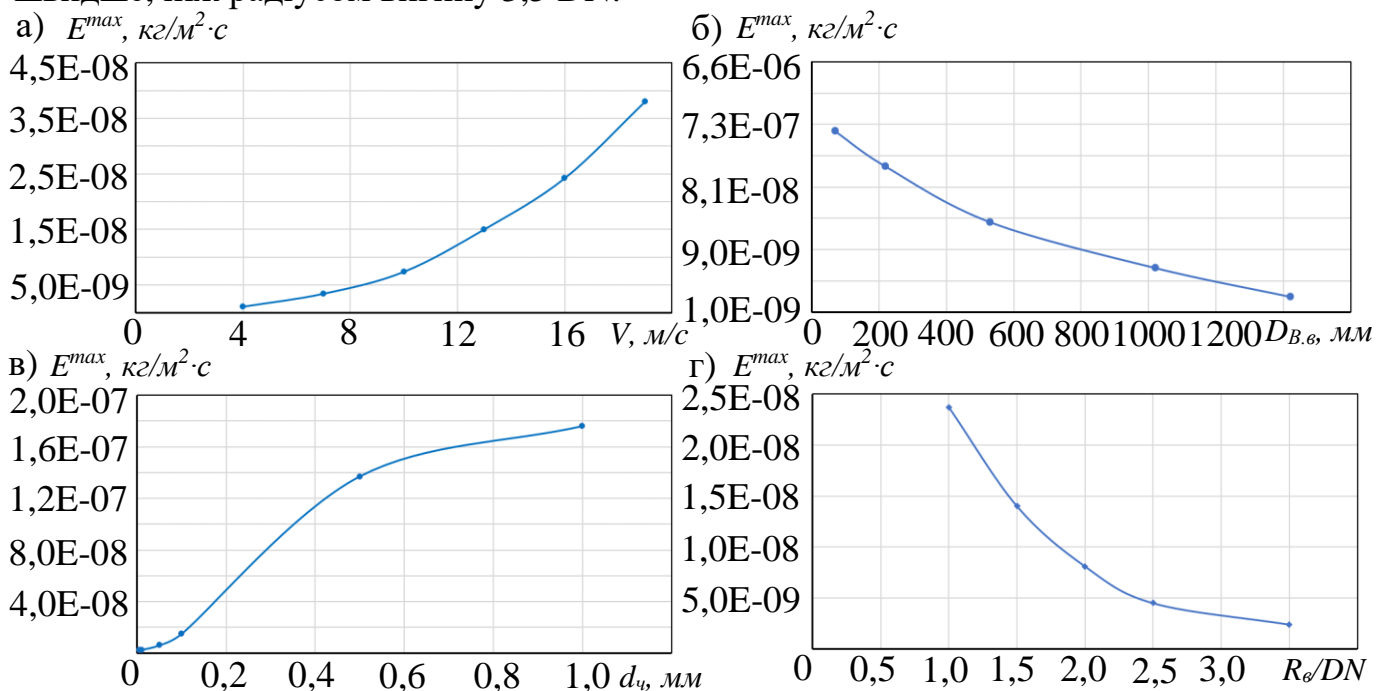
а) – поля швидкості ерозійного зношування на контурах; б) – місце видаленої двофазним потоком фарби

Рисунок 12 – Результати моделювань та експериментальних досліджень ерозійного зношування відводів

максимального ерозійного зношування все більше зміщується від місця виходу з відводу газового потоку до середини опуклого боку відводу, а зі збільшенням радіуса вигину відводу поле максимального ерозійного зношування з опуклого боку відводу все більше зміщується від місця виходу з відводу потоку до місця входу потоку в відвід. При малих діаметрах дисперсних частинок поле максимального ерозійного зношування відводу з опуклого його боку борозноподібне і простягається між кутом 45° і 80° відводу в місці виходу з нього газового потоку. Зі збільшенням діаметра дисперсних частинок поле максимального ерозійного зношування набуває зосередженості та все більше поширюється до місця виходу з

відводу газового потоку опуклим його боком. Витрата дисперсних частинок і швидкість потоку значною мірою не впливають на місцезнаходження їх ерозійного зношування.

За результатами чисельного моделювання побудовано графічні залежності та визначено, що на інтенсивність ерозійного зношування відводів трубопровідних систем найбільше впливає швидкість двофазного потоку (рис. 13, а), внутрішній діаметр відводу (рис. 13, б), діаметр дисперсних частинок (рис. 13, в) і радіус вигину відводу (рис. 13, г). При збільшенні діаметра дисперсних частинок від 0,005 мм до 1,0 мм максимальна швидкість ерозійного зношування відводів збільшується в 70 разів, а при збільшенні швидкості газового потоку від 4 м/с до 19 м/с максимальна швидкість ерозійного зношування відводів збільшується в 35 разів. Відводи газопроводу з кутом вигину 30° в 2,5 рази швидше ерозійно зношуються, ніж відводи з кутом вигину 90° , а відводи радіусом вигину рівним DN у 9,8 разів швидше, ніж радіусом вигину 3,5 DN.



а) – швидкості двофазного потоку; б) – діаметра дисперсних фаз; в) – внутрішнього діаметра відводу; г) – відношення радіуса вигину відводу до його умовного діаметра

Рисунок 13 – Залежність максимальної швидкості ерозійного зношування відводів від їх геометричних параметрів та параметрів двофазних потоків

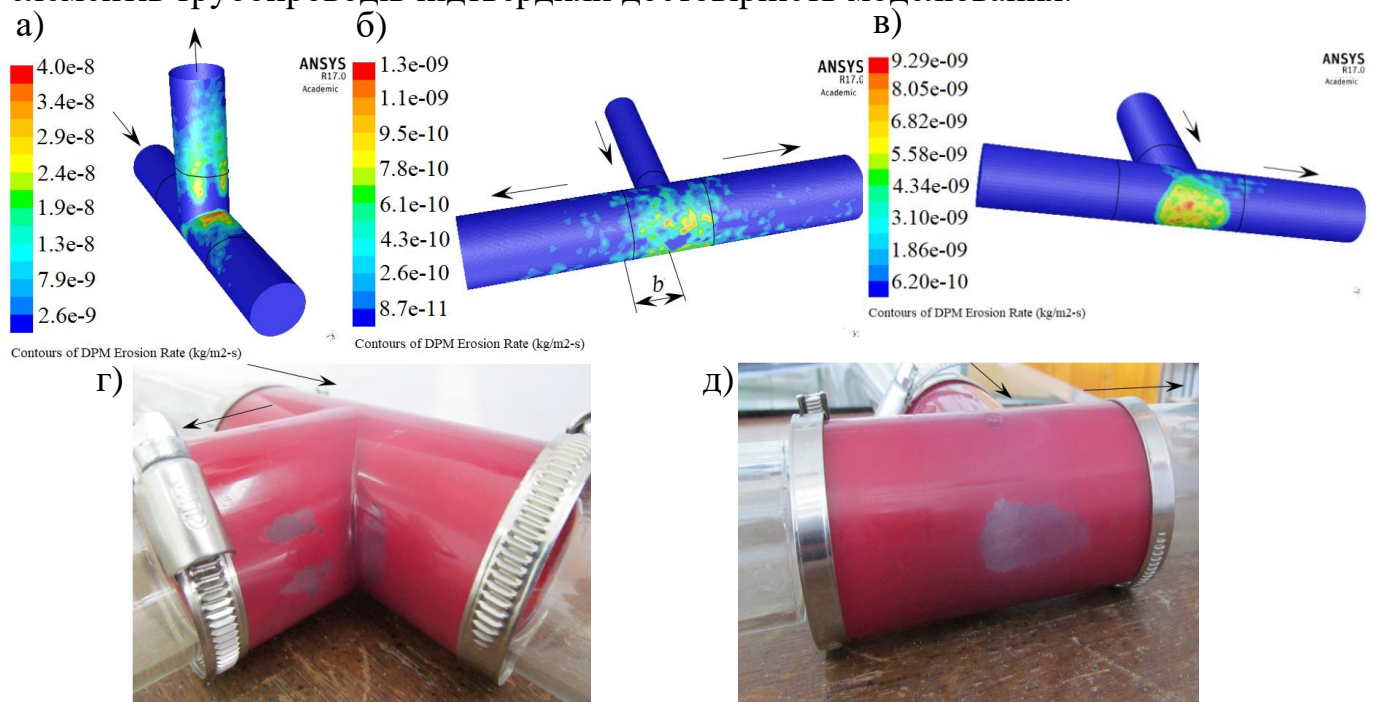
За отриманими результатами виведено емпіричну залежність для розрахунку швидкості ерозійного зношування відводів, яка враховує їх геометричні параметри, експлуатаційні параметри транспортування та діаметри і витрату дисперсних фаз. Швидкість ерозійного зношування відводу рівна

$$E = \frac{C \phi V^2 d_p^2 q_p}{D_n^{0,02} v_z^2 R_g^2}, \quad (5)$$

де C – коефіцієнт, який рівний $4,2 \cdot 10^{-13}$; q_p – витрата дисперсних частинок.

Визначено закономірності впливу напрямків руху потоків трійниками трубопровідних систем на місцезнаходження й інтенсивність ерозійного

зношування. У трійниках, в яких потік рухається магістрально трійника і з магістралі повністю або частково перетікає у відгалуження трійника найінтенсивніше ерозійне зношування відбувається і у його магістралі, одразу за відгалуженням, у яке перетікає потік, і у відгалуженні з боку його стінки на яку набігає потік (рис. 14, а, г). У трійниках, в яких потік рухається відгалуженням трійника і з відгалуження розходить у дві сторони магістралі трійника, місце найінтенсивнішого ерозійного зношування трійника розміщено в магістралі трійника навпроти відгалуження трійника і має форму кільця викривленого внутрішньою поверхнею магістралі трійника (рис. 14, б). Якщо потік рухається відгалуженням трійника і з нього перетікає в одну зі сторін магістралі трійника, то місце найінтенсивнішого ерозійного зношування трійника має грушоподібну форму і розміщене навпроти відгалуження трійника та витягнуто в сторону руху потоку магістрально трійника (рис. 14, в, д). Експериментально виявлено місця ерозійного зношування фасонних елементів трубопроводів підтвердили достовірність моделювання.



а), б), в) – поля швидкості ерозійного зношування на контурах; г), д) – місце видаленої двофазним потоком фарби

Рисунок 14 – Результати моделювань та експериментальних досліджень ерозійного зношування трійників

Виконано комплексний аналіз результатів експериментальних досліджень фасонних елементів трубопровідних систем шляхом їх поєднання з результатами моделювань руху багатозфазних потоків такими елементами (результатами такого моделювання були траєкторії руху дисперсних фаз фасонними елементами), результатами моделювань ерозійного зношування.

Достовірність визначення місць ерозійного зношування фасонних елементів трубопроводів моделюванням також була підтверджена експериментальними дослідженнями в умовах магістральних газопроводів. Переважна більшість місць зменшення товщини стінки досліджуваних фасонних елементів газопроводів

відповідала визначеним моделюванням місцям максимальної швидкості їх ерозійного зношування.

Для експериментального визначення швидкості ерозійного зношування стінки фасонних елементів трубопроводів необхідно вимірювання їх товщини виконувати з певним інтервалом часу протягом не менше декількох років. Було виконано аналіз даних ультразвукових вимірювань товщин стінок відводів трубопроводів технологічної обв'язки газоперекачувальних агрегатів компресорних станцій і виявлено, що до 2014 року швидкість стоншування стінки відводів газопроводів у декілька разів менша, ніж після. Також на вході в газоперекачувальний агрегат ерозійне зношування відводів після 2014 року відбувалось інтенсивніше, ніж на виході. Причинами цього є режимні параметри транспортування. Останніми роками обсяги перекачування газу значно зменшились, у результаті чого компресорні станції деяких магістральних газопроводів працюють через одну. Такий режим роботи магістрального газопроводу призводить до того, що тиск на вході працюючих компресорних станцій значно менший, ніж проектний. Таке зменшення тиску зумовлює збільшення швидкості газового потоку, що, своєю чергою, призводить до збільшення втрат гідравлічної енергії в фасонних елементах та збільшення швидкості їх ерозійного зношування.

Серед усіх трубопровідних систем у найгіршому стані в Україні перебувають трубопроводи тепломереж. Стан тепломереж великих міст критичний, про що свідчить велика кількість аварій із різноманітними негативними наслідками. В трубопроводах тепломереж, крім зовнішніх корозійних процесів, відбуваються активні внутрішні корозійні процеси. Інтенсивна внутрішньотрубна корозія тепломереж призводить до збільшення концентрації продуктів корозії в потоці теплоносія. Такі процеси спричиняють ерозійне зношування фасонних елементів трубопроводів, яке в теплових мережах накладається на внутрішнє корозійне зношування. Прикладом цього є трійник тепломережі міста Київ у якому потік гарячої води переважно більшість часу перетікав із відгалуження трійника у одну зі сторін магістралі, і навпроти відгалуження трійника виник аварійний витік (рис. 15, а). Дефектний трійник було вирізано з тепломережі. Під час детального візуального огляду внутрішньої поверхні трійника було виявлено ознаки ерозійно-корозійного зношування.

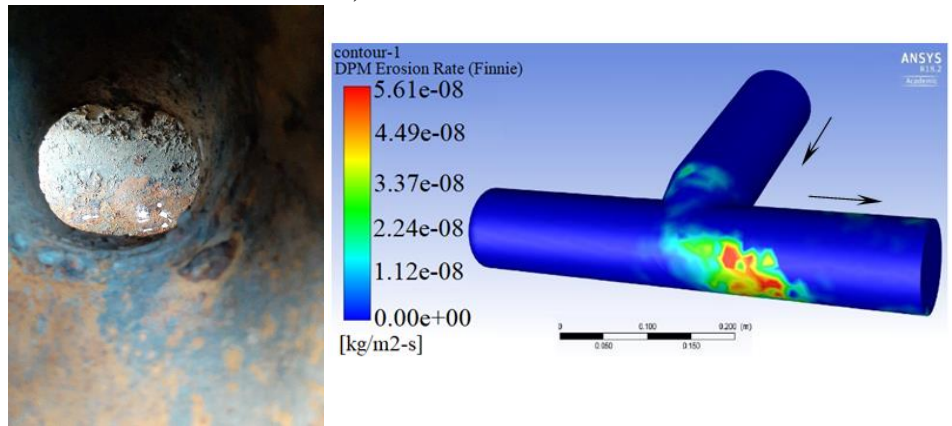
Експериментальні та теоретичні дослідження закономірностей процесів, які відбуваються у внутрішній порожнині трійника тепломережі показали, що причинами його зношування є синергетичний вплив ерозії та внутрішньої корозії. Металографічними дослідженнями визначено, що в трійнику відбувались корозійно-ерозійні процеси. Ерозійне зношування трійника тепломережі відбувалось видаленням окислених перлітних прошарків і окремих зерен фериту продуктами внутрішньотрубною корозії, які переносяться потоком теплоносія й іншими забрудненнями. Збільшенню інтенсивності ерозійного зношування трійника сприяло зменшення твердості його внутрішньої поверхні, яка була значно меншою, ніж твердість зовнішньої поверхні, та погіршення міцнісних характеристики сталі трійника під час його експлуатації. Тимчасовий опір та границя плинності сталі трійника були менші відповідних характеристик сталі трійника, зазначених у технічних умовах. Місце поля максимальної швидкості ерозійного зношування

трійника, визначене CFD моделюванням (рис. 15, б), співпадало з місцем наскрізних дефектів трійника (рис. 15, а). Найбільша швидкість потоку теплоносія, визначена моделюванням, спостерігалася в місці ерозійного зношування, що посилювало його інтенсивність.

а)



б)



а) – місцезнаходження наскрізних дефектів; б) – поля швидкості ерозійного зношування на контурах

Рисунок 15 – Трійник тепломережі з наскрізними дефектами та результати моделювання його ерозійного зношування

У п'ятому розділі “Дослідження напружено-деформованого стану фасонних елементів трубопровідних систем” розроблено алгоритм комплексного чисельного моделювання напружено-деформованого стану фасонних елементів трубопровідних систем складної геометричної форми з урахуванням газодинамічних процесів, які відбуваються у їхній внутрішній порожнині, ерозійного зношування стінки та температурного перепаду. Визначено закономірності впливу глибини ерозійних дефектів складної тривимірної геометричної форми на напружено-деформований стан стінки фасонних елементів трубопроводів. Виконано математичне моделювання напружено-деформованого стану ерозійно та корозійно зношених відводів трубопроводів. Розроблено покроковий алгоритм визначення значення допустимої товщини стінки фасонних елементів у місці ерозійного зношування, алгоритм оцінювання працездатності таких елементів.

Нерівномірний розподіл тиску, ерозійне зношування, температурний вплив, складна геометрична форма фасонних елементів трубопровідних систем впливають на їх напружено-деформований стан. Тому задачу дослідження напружено-деформованого стану елементів трубопроводів складної геометричної форми вирішувалась у тривимірній постановці поєднанням газодинамічного, температурного моделювання з моделюванням напружено-деформованого стану. Виконувалось мультидисциплінарне моделювання. Вирішення такої задачі виконувалось за допомогою інтегруючого середовища розрахунків ANSYS Workbench в якому було об'єднано в один інтерфейсі гідрогазодинамічний, температурний модулі та модуль статичного аналізу. Результати моделювання нерівномірного розподілу тиску на внутрішній стінці фасонних елементів з гідрогазодинамічного модуля ANSYS Fluent імпортувались у модуль статичного аналізу ANSYS Static Structural (рис. 16).

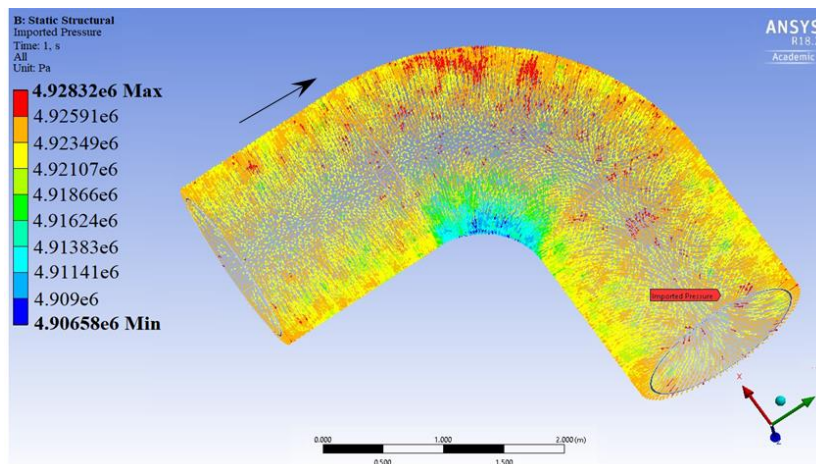
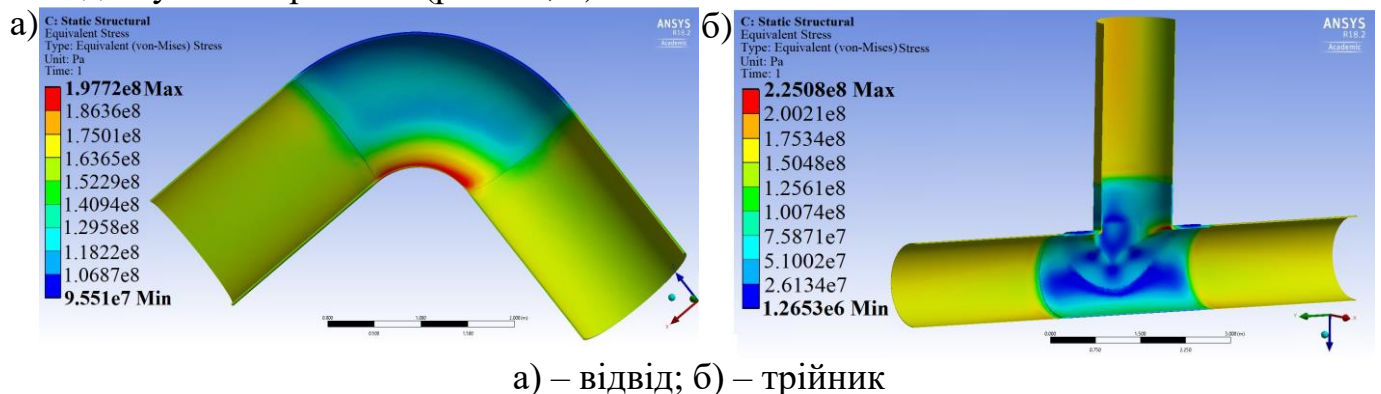


Рисунок 16 – Імпортовані з ANSYS Fluent в ANSYS Static Structural результати моделювання розподілу тиску на внутрішній стінці відводу

У відводах трубопровідних систем максимальні еквівалентні напруження за Мізесом зосереджені з ввігнутого боку відводу, а мінімальні – з опуклого (рис. 17, а). З опуклого боку відводів у місці його ерозійного зношування існує певний запас по товщині стінки, що зумовлено його геометричною формою. У зварних трійниках, підсилених накладками на магістралі і відгалуженні трійника, максимальні еквівалентні напруження зосереджені в місці різкої зміни геометрії трійника (в місці приєднання відгалуження до магістралі трійника), де немає підсилюючої накладки на відгалуженні трійника (рис. 17, б).

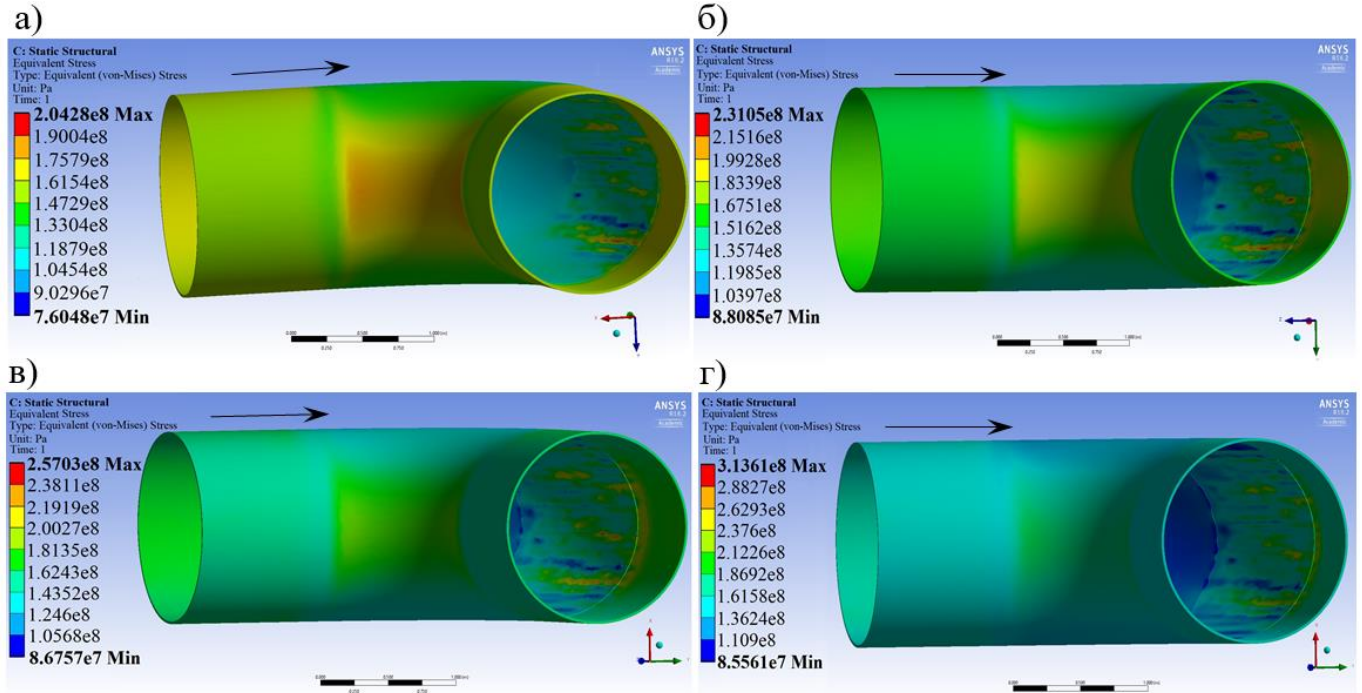


а) – відвід; б) – трійник

Рисунок 17 – Розподіл еквівалентних напружень Мізеса в фасонних елементах трубопровідних систем

Ерозійне зношування фасонних елементів трубопровідних систем відбувається з певною швидкістю і величина та геометрична форма ерозійних дефектів із часом змінюється. Для врахування впливу ерозійних дефектів фасонних елементів трубопроводів на їх напружений стан було розроблено методику побудови геометричних моделей фасонних елементів із тривимірними ерозійними дефектами стінки складної геометричної форми, які будуть через певні проміжки часу. Стінка в місці ерозійного зношування фасонних елементів стоншувалась відповідно до швидкості ерозійного зношування визначеної CFD моделюванням. Моделюванням визначались закономірності впливу величини ерозійних дефектів на напружено-деформований стан фасонних елементів із урахуванням газодинамічних процесів, які відбуваються в їх внутрішній порожнині.

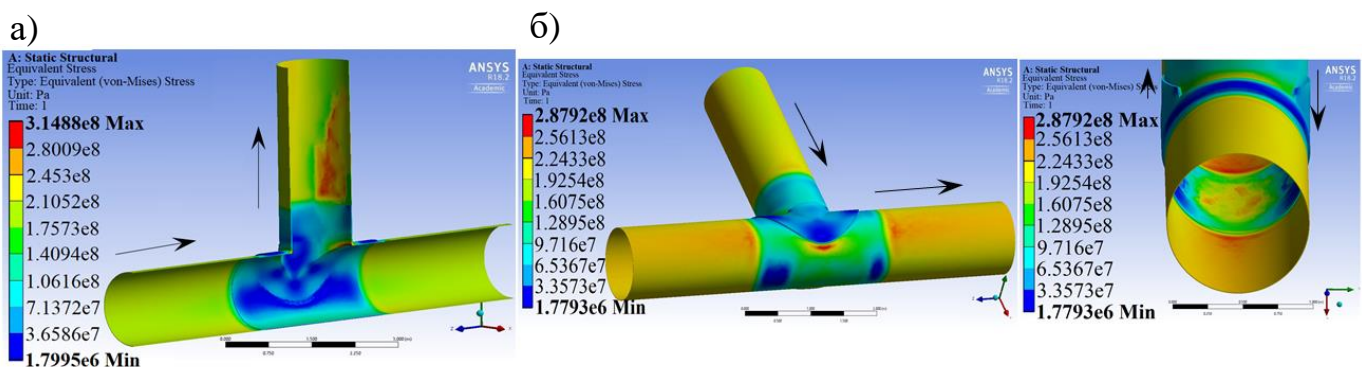
У відводах трубопровідних систем за незначної глибини ерозійних дефектів стінки максимальні еквівалентні напруження зосереджені з ввігнутого боку відводу (рис. 18, а). Зі збільшенням глибини ерозійного дефекту стінки відводів максимальні еквівалентні напруження зосереджуються в найглибших місцях ерозійних дефектів (рис. 18, б, в, г).



а) – максимальна глибина ерозійного дефекту 6,9 мм; б) – максимальна глибина ерозійного дефекту 9,6 мм; в) – максимальна глибина ерозійного дефекту 10,5 мм; г) – максимальна глибина ерозійного дефекту 11,9 мм

Рисунок 18 – Розподіл еквівалентних напружень Мізеса в ерозійно зношеному відводі

Аналогічні дослідження були виконані для трійників трубопровідних систем. Якщо увесь потік із магістралі трійника перетікає у відгалуження то максимальні еквівалентні напруження, зумовлені ерозійним зношуванням, виникають у найглибших місцях ерозійних дефектів привареної до відгалуження трійника труби (рис. 19, а). У трійниках, в яких потік із відгалуження перетікає в одну зі сторін

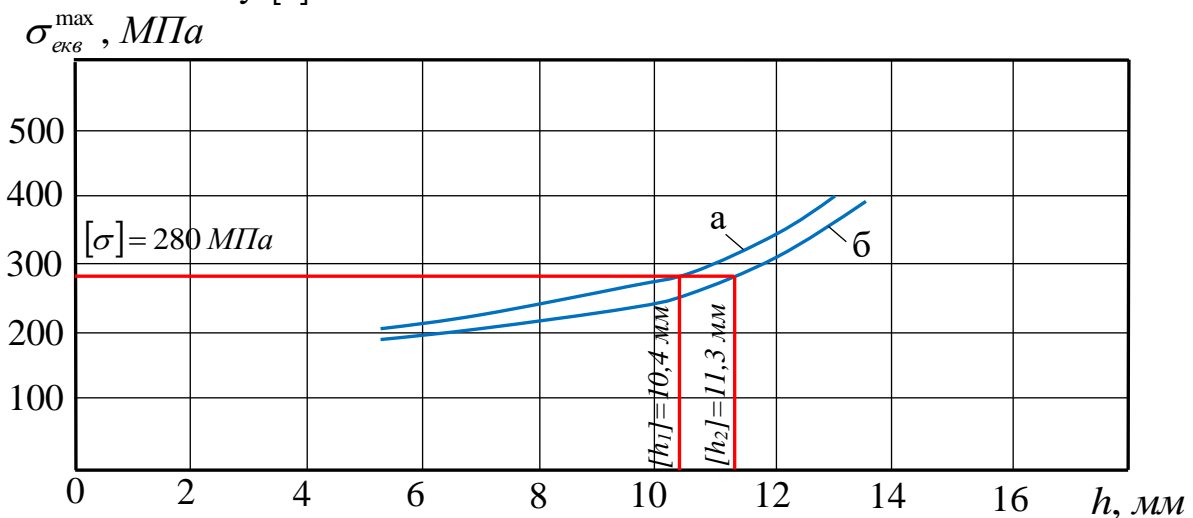


а) – потік рухається магістраллю, з якої повністю перетікає у відгалуження; б) – потік рухається відгалуженням і з відгалуження перетікає в одну сторону магістралі

Рисунок 19 – Розподіл еквівалентних напружень Мізеса в ерозійно зношених трійниках

магістралі, максимальні еквівалентні напруження зумовлені ерозійним зношенням зосереджені з зовнішньої сторони магістралі трійника біля підсилюючої накладки розміщеної на магістралі трійника. Зона максимальних еквівалентних напружень має дугоподібну форму й огинає нижню частину розміщеної на магістралі трійника підсилюючої накладки з двох боків магістралі трійника (рис. 19, б). Таке місцезнаходження зони максимальних еквівалентних напружень зумовлене збільшенням деформацій непідсиленої частини магістралі трійника причиною чого є зменшення товщини стінки магістралі трійника в місці ерозійного зношування, яке розміщене навпроти відгалуження трійника.

За результатами моделювання напружено-деформованого стану ерозійно зношених елементів трубопровідних систем складної геометричної форми було побудовано графічні залежності максимальних еквівалентних напружень $\sigma_{екв}^{max}$ від максимальної глибини ерозійного дефекту стінки h (рис. 20). Із графічних залежностей було визначено значення допустимих максимальних глибин ерозійних дефектів стінки фасонних елементів $[h]$, яка відповідала допустимим напруженням $[\sigma]$. Тоді була визначена допустима товщина стінки в місці ерозійного зношування фасонного елементу $[\delta]$.



а) – від дії внутрішнього тиску; б) – від дії внутрішнього тиску та температурного перепаду

Рисунок 20 – Залежність максимальних еквівалентних напружень від максимальної глибини ерозійного дефекту стінки відводу

Також напружено-деформований стан ерозійно та корозійно зношених відводів трубопроводів був описаний математично. Задача вирішувалась у тороїдальній системі координат із наступними допущеннями

$$\begin{cases} x = (R_g + r \cos \varphi) \cos \theta \\ y = (R_g + r \cos \varphi) \sin \theta \\ z = r \sin \varphi \end{cases} \quad (6)$$

де r – радіальна компонента; φ – полярний кут у перерізі; θ – кут навкруги осі z тора.

Для таких допущень формули Кристофеля II роду будуть наступними:

$$\begin{cases} \Gamma_{33}^1 = \cos \theta (R_g - r \cos \theta); \Gamma_{22}^1 = -r; \Gamma_{12}^2 = \Gamma_{21}^2 = \frac{1}{r} \\ \Gamma_{33}^2 = -\frac{\sin \theta (R_g - r \cos \theta)}{r}; \Gamma_{13}^3 = -\frac{\cos \theta}{R_g - r \cos \theta} \\ \Gamma_{23}^3 = \frac{r \sin \theta}{R_g - r \cos \theta} \end{cases} \quad (7)$$

Тоді система рівнянь рівноваги відносно компонент $u(r, \theta)$; $v(r, \theta)$ записується наступним чином

$$\begin{cases} (\lambda + 2\mu) \left[\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{\partial u}{\partial r} \frac{1}{r} - \frac{u}{r^2} \right] + \frac{\partial^2 u}{\partial \theta^2} \mu \frac{1}{r^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial r \partial \theta} \left(\lambda \frac{1}{r^2} + \mu \frac{1}{r^2} \right) + (\lambda + 2\mu) \frac{\partial u}{\partial r} \frac{\cos \theta}{(R_g - r \cos \theta)} + \\ + \mu \frac{\partial u}{\partial \theta} \frac{\sin \theta}{r(R_g - r \cos \theta)} + \frac{\partial v}{\partial r} (\lambda + 2\mu) \frac{\sin \theta}{r(R_g - r \cos \theta)} - 2 \frac{\partial v}{\partial \theta} (\lambda + 2\mu) \frac{1}{r^3} + \\ + u \left(-\frac{1}{r^2} (\lambda + 2\mu) - (\lambda + 2\mu) \frac{\cos^2 \theta}{(R_g - r \cos \theta)^2} \right) + v \left[(\lambda + 2\mu) \frac{\sin \theta \cos \theta}{r(R_g - r \cos \theta)^2} - \frac{\sin \theta (\lambda + 2\mu)}{r^2 (R_g + r \cos \theta)} \right] = 0 \\ \frac{\partial^2 u}{\partial r \partial \theta} (\lambda + \mu) \frac{1}{r^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial r^2} \mu \frac{1}{r^2} + (\lambda + 2\mu) \frac{\partial^2 v}{\partial \theta^2} \frac{1}{r^4} + \frac{\partial u}{\partial \theta} \left(3\mu \frac{1}{r^3} + \lambda \frac{1}{r^3} - \frac{(\lambda + \mu) \cos \theta}{r^2 (R_g + r \cos \theta)} \right) + \\ + \frac{\partial v}{\partial r} \left(-\mu \frac{1}{r^3} - \mu \frac{1}{r^2} \frac{\cos \theta}{R_g - r \cos \theta} \right) + (\lambda + 2\mu) \frac{\partial v}{\partial \theta} \frac{\sin \theta}{r^3 (R_g - r \cos \theta)} + u \left((\lambda + \mu) \frac{1}{r^2} \frac{R_g \sin \theta}{(R_g - r \cos \theta)^2} \right) + \\ + \frac{v(\lambda + 2\mu)}{r^3} \frac{R_g \cos \theta - r}{(R_g - r \cos \theta)^2} = 0 \end{cases} \quad (8)$$

Розв'язок системи (8) вимагає значних обчислювальних зусиль, проте для практичного їх розв'язання можна прийняти допущення, що для тороподібних елементів трубопроводних систем при $R_g \rightarrow \infty$ $v \ll u$; $\frac{\partial v}{\partial \theta}$; $\frac{\partial^2 v}{\partial \theta^2}$; $\frac{\partial u}{\partial \theta}$; $\frac{\partial^2 u}{\partial \theta^2}$; $\frac{\partial^2 u}{\partial \theta \partial r}$; $\frac{\partial^2 v}{\partial \theta \partial r} \ll u$; $\frac{\partial u}{\partial r}$; $\frac{\partial^2 u}{\partial r^2}$, це дає змогу зробити висновок про те, що система (8) вироджується в одне рівняння (перший доданок системи (8), перше рівняння)

$$\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{\partial u}{\partial r} \frac{1}{r} - \frac{u}{r^2} = 0, \quad (9)$$

яке є основним рівнянням задачі Ламе.

Приймаючи до уваги наведене вище допущення, що при зменшенні товщини стінки відводу трубопроводу в результаті ерозійного зношування конфігурація поперечного перерізу мало відрізняється від кругової розрахунок номінальних кільцевих напружень, які виникають у стінці відводу від дії внутрішнього тиску можна виконати за формулою

$$\sigma_{\kappa\theta}^H = \frac{P R_{B,g}(\theta)}{\delta(\theta)}, \quad (10)$$

де P – робочий тиск продукту в трубопроводі; $R_{B,g}(\theta)$ – внутрішній радіус відводу трубопроводу, який зазнає змін у результаті ерозійного зношування стінки; $\delta(\theta)$ – залежна від кута θ товщина стінки відводу трубопроводу

$$\delta(\theta) = R_{3,g} - R_{B,g}(\theta), \quad (11)$$

де $R_{3,g}$ – зовнішній радіус відводу трубопроводу (рис. 21).

Якщо відбувається корозія зовнішньої стінки відводу тоді

$$\delta(\theta) = R_{3,e}(\theta) - R_{B,e}, \quad (12)$$

де $R_{3,e}(\theta)$ – зовнішній радіус відводу трубопроводу, який зазнає змін у результаті корозійного зношування; $R_{B,e}$ – внутрішній радіус відводу трубопроводу.

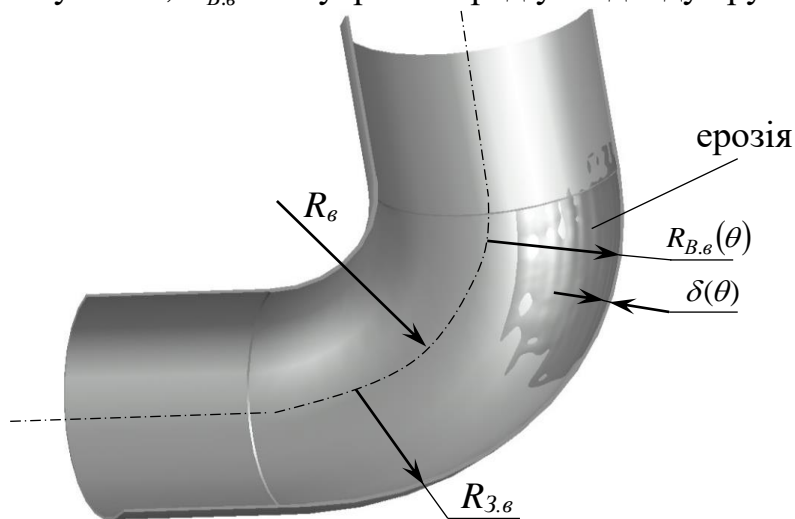


Рисунок 21 – Розрахункова схема ерозійно зношеного відводу

Обмежує застосування формули (10) допущення, що в результаті ерозійного зношування відводів трубопроводів їх поперечний переріз мало відрізняється від кільцевого. Тому за результатами математичного і чисельного моделювання було визначено максимальні еквівалентні напруження в стінці ерозійно зношених відводів трубопровідних систем від дії внутрішнього тиску для різних глибин ерозійного дефекту (рис. 22). Було визначено, що, якщо фактична товщина стінки тороподібного відводу трубопроводу в місці максимального ерозійного зношування є більшою 70 % номінальної товщини стінки відводу, то результати чисельного моделювання підтверджують достовірність результатів математичного моделювання. При більших величинах ерозійних дефектів починає різко зростати розбіжність результатів, а тому в цьому випадку напружений стан ерозійно зношених відводів трубопровідних систем рекомендовано розраховувати чисельним моделюванням.

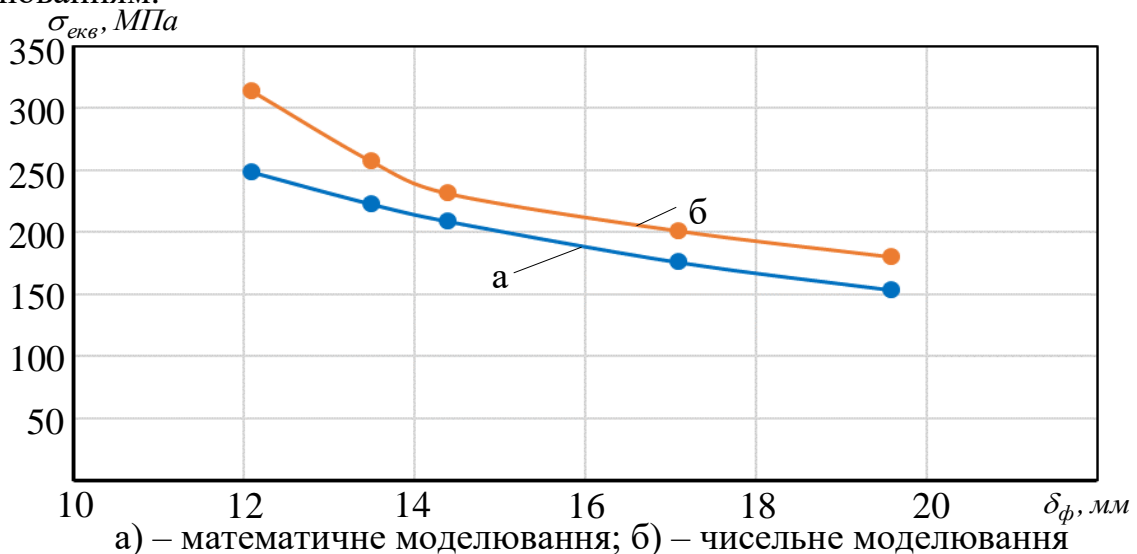


Рисунок 22 – Залежність максимальних еквівалентних напружень від фактичної товщини стінки відводу в місці максимального ерозійного зношування

Основними критеріями працездатності фасонних елементів трубопровідних систем є міцність. Розроблено покроковий алгоритму оцінювання міцності фасонних елементів трубопровідних систем. Якщо фактична товщина стінки відводу трубопроводу в місці максимального ерозійного чи корозійного зношування є більшою 70 % номінальної товщини стінки відводу, то номінальні кільцеві напруження, які виникають у стінці відводу від дії внутрішнього тиску рекомендовано визначити за (10). Тоді еквівалентні напруження можна визначити за енергетичною теорією міцності. Якщо фактична товщина стінки відводу трубопроводу в місці максимального ерозійного чи корозійного зношування є меншою 70 % номінальної товщини стінки то еквівалентні напруження у стінці такого відводу рекомендовано розраховувати чисельним методом. При цьому геометрична форма та місцезнаходження ерозійних чи корозійних дефектів повинні максимально відповідати фактичним даним.

Наведено умову забезпечення статичної міцності фасонних елементів трубопроводів і формулу для розрахунку залишкового ресурсу фасонних елементів із ерозійним зношенням стінки.

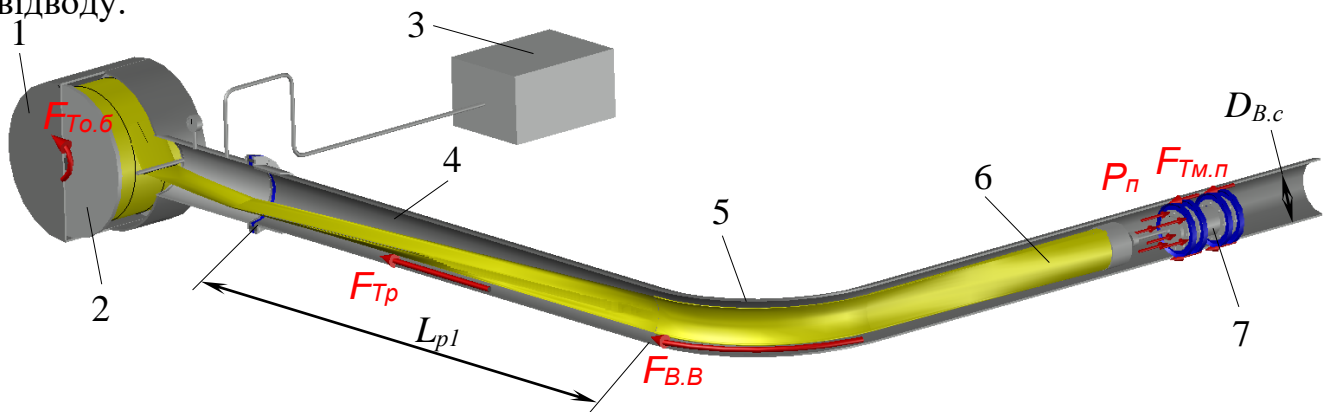
В шостому розділі “Розроблення технології ремонту зношених відводів трубопроводів” запропоновано виконувати ремонт ерозійно чи корозійно зношених відводів складних трубопровідних систем безтраншейним способом – протягуванням поршнем рукава чи гнучкої композитної труби. Визначено закономірності зміни тиску компресора під час протягування поршнем рукава. Розроблено техніку та технології ремонту відводів трубопроводів протягуванням поршнем рукава чи гнучкої композитної труби. Приведено результати промислової апробації та впровадження розробленої технології у виробництво.

Щоб визначити, чи можливо реалізувати ідею ремонту ерозійно або корозійно зношених відводів трубопроводів шляхом протягування поршнем рукава, підібрати обладнання для виконання робіт, потрібно знати величину необхідного для цього тиску. Такий тиск було визначено шляхом визначення всіх сил, які діють на рухоми систему (рис. 23). Очевидно, що тягове зусилля залежить від кута вигину відводу, оскільки у відводах відбувається зміна напрямку дії тягової сили, в результаті чого рукав притискається до внутрішньої стінки трубопроводу в місці відводу (рис. 24). Виведено рівняння для розрахунку сили тертя, зумовленої притисканням натягнутого рукава до внутрішньої стінки трубопроводу в місці відводу,

$$F_{B.B} = 2f_p \frac{f_p q_p L_{p1} + \frac{q_{\sigma} f_{\text{ков}} r_{\sigma, \delta}}{R_{\sigma}}}{1 - 2f_p \sin \frac{\varphi}{2}} \sin \frac{\varphi}{2} \left(1 + f_p \sin \frac{\varphi}{2} \right), \quad (13)$$

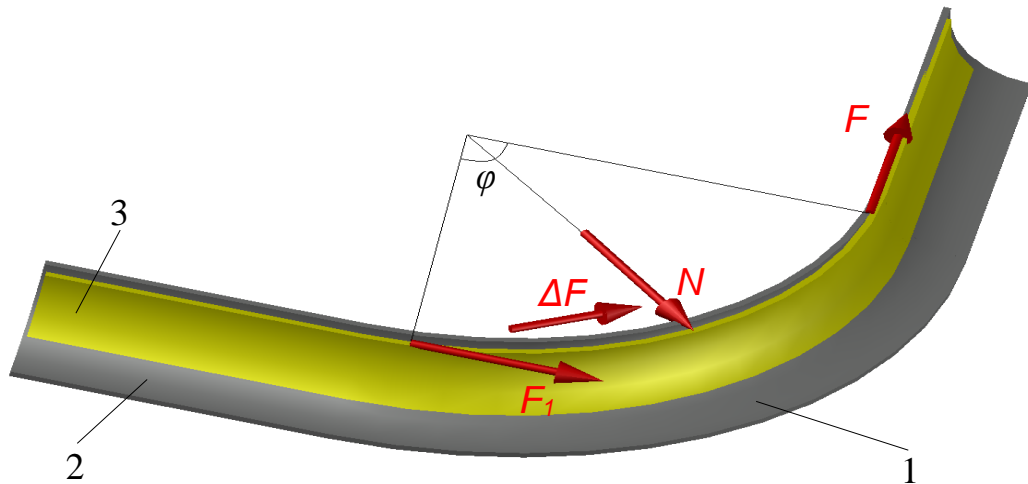
де f_p – коефіцієнт тертя між протягуваним поршнем рукавом і сталевим трубопроводом; q_p – вага погонного метра протягнутого поршнем рукава; L_{p1} – довжина протягнутого поршнем рукава до входу рукава у відвід; q_{σ} – вага барабана, на який намотано протягуваний рукав; $f_{\text{ков}}$ – коефіцієнт тертя ковзання між осердям барабана, на який намотано рукав, та циліндричними виступами в бокових поверхнях герметичної циліндричної камери, на яких обертається барабан;

$r_{\delta, \delta}$ – радіус циліндричних виступів у бокових поверхнях герметичної циліндричної камери; R_{δ} – радіус осердя барабана, на який намотано рукав; φ – кут вигину відводу.



1 – герметична циліндрична камера; 2 – барабан; 3 – компресор; 4 – зношений сталевий трубопровід; 5 – дефектний відвід; 6 – протягуваний рукав; 7 – поршень

Рисунок 23 – Розрахункова схема протягування поршнем рукава трубопроводом, який містить дефектний відвід



1 – відвід; 2 – сталева труба; 3 – рукав

Рисунок 24 – Розрахункова схема протягування рукава відводом

Складено баланс сил, які діють на рухому систему, і визначено потрібний тиск повітря в запоршневому просторі, щоб поршень протягував рукав трубопроводом, який містить дефектний відвід

$$P_{II} = \frac{4 \left(n_{m.n} f_{m.n} E h_m D_{B.c} \frac{D_{M.n} - D_{B.c}}{D_{M.n}} + f_p q_p L_p + \frac{q_{\delta} f_{\text{ков}} r_{\delta, \delta}}{R_{\delta}} \right)}{\pi D_{B.c}^2} + \frac{2 f_p \left(\frac{f_p q_p L_{p1} + \frac{q_{\delta} f_{\text{ков}} r_{\delta, \delta}}{R_{\delta}}}{1 - 2 f_p \sin \frac{\varphi}{2}} \sin \frac{\varphi}{2} \left(1 + f_p \sin \frac{\varphi}{2} \right) \right)}{\pi D_{B.c}^2}, \quad (14)$$

де $n_{m.n}$ – кількість манжет поршня; $f_{m.n}$ – коефіцієнт тертя між гумовими манжетами поршня та стінкою сталевого трубопроводу; E – модуль пружності гуми, з якої

виготовлені манжети поршня; h_m – товщина гумової манжети поршня; $D_{B.c}$ – внутрішній діаметр сталевого трубопроводу, в який поршнем протягується рукав; $D_{M.n}$ – діаметр манжет не запасованого в реконструйований трубопровід поршня; L_p – довжина рукава.

Визначено закономірності зміни тиску на виході компресора під час протягування поршнем рукава трубопроводом, який містить ерозійно чи корозійно зношений відвід. Під час протягування поршнем рукава прямолінійною ділянкою трубопроводу відбувається плавне поступове збільшення тиску (рис. 25), величина якого визначається силами тертя рукава між манжетами поршня та стінкою трубопроводу. Коли змінюється напрям протягування в місці дефектного відводу трубопроводу відбувається різке збільшення тиску, величина якого визначається силою притискання рукава до внутрішньої стінки трубопроводу і залежить від кута вигину відводу. Необхідний тиск для протягування поршнем рукава трубопроводом довжиною 100 мм і внутрішнім діаметром 49 мм, який містить посередині відвід із кутом вигину 90° , склав 0,29 МПа. Зі зменшенням кута вигину відводу потрібний тиск компресора для протягування рукава зменшується і для кута вигину 30° склав 0,2 МПа.

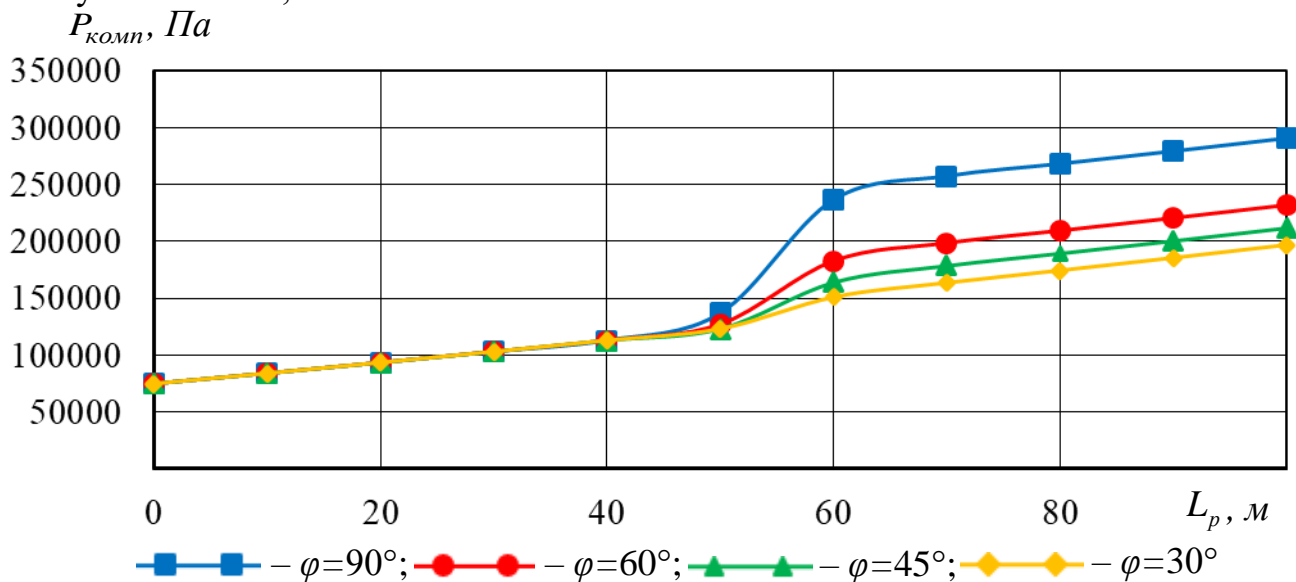


Рисунок 25 – Залежність тиску компресора від довжини протягнутого поршнем рукава трубопроводом, який містить дефектний відвід

Визначено закономірності зміни тиску для подолання сили тертя зумовленої притисканням рукава до внутрішньої стінки трубопроводу в місці відводу від кута вигину відводу (рис. 26). Кут вигину відводу змінювався від 30° до 90° . Для відводу внутрішнім діаметром 49 мм із кутом вигину 90° найбільший тиск потрібний для подолання досліджуваної сили тертя склав 0,11 МПа, що не є високим тиском. Необхідний тиск для протягування поршнем рукава відводом із кутом вигину 30° у 6 разів менший, ніж відводом із кутом вигину 90° . Тому протягнути поршнем рукав можна в складну трубопровідну систему, яка містить декілька відводів, що на сьогодні неможливо виконати жодним із існуючих методів безтраншейної реконструкції.

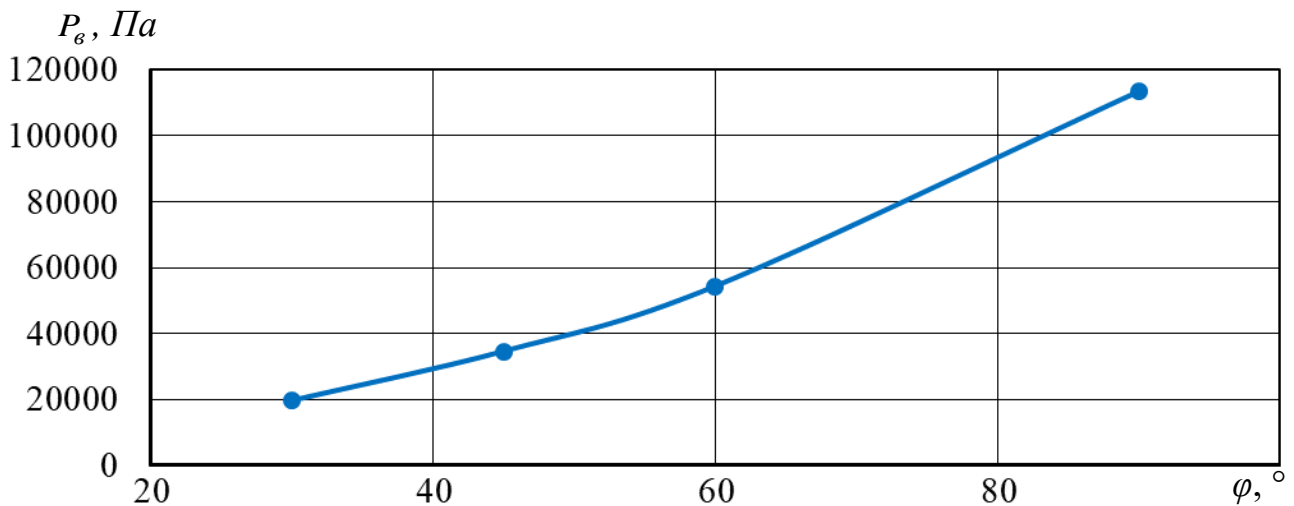
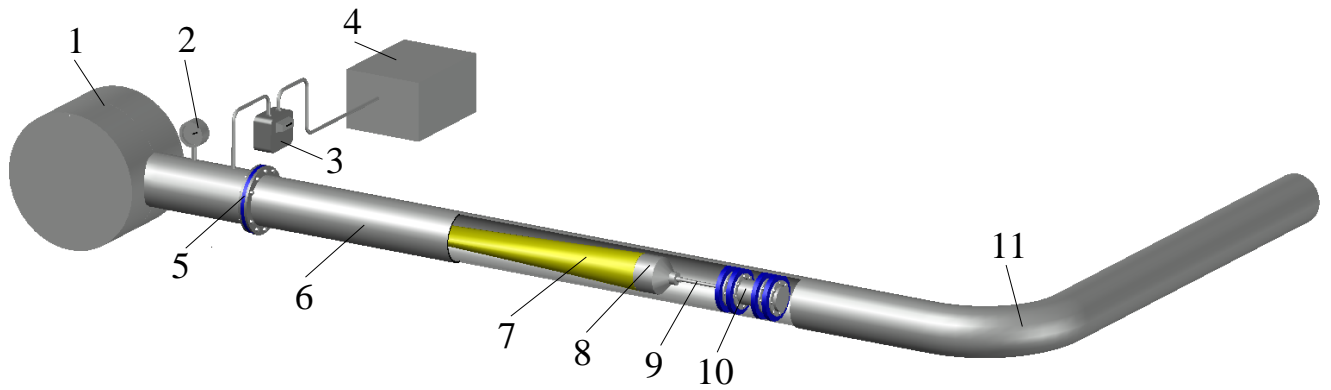


Рисунок 26 – Залежність необхідного тиску для подолання сили тертя між рукавом і внутрішньою стінкою трубопроводу в місці зміни напрямку його протягування від кута вигину відводу

Також усі сили опору, які діють на рухоми систему під час протягування поршнем рукава трубопроводом, що містить дефектний відвід, були визначені експериментально, і було підтверджено достовірність теоретично виведених залежностей.

Для експериментального перевіряння можливості реалізації ідеї протягування поршнем рукава сталевим трубопроводом, який містить ерозійно зношений відвід, дослідження динаміки цього процесу розроблено та виготовлено лабораторну експериментальну установку (рис. 27). Експериментально визначено закономірності зміни тиску на виході компресора під час протягування поршнем рукава трубопроводом, який містить ерозійно чи корозійно зношений відвід, підтверджено достовірність теоретично виведених залежностей.

Розроблено техніку та технологію ремонту ерозійно чи корозійно зношених відводів складних трубопровідних систем. Особливістю цієї технології є те, що в трубопровід запасовують поршень 10 і до нього кріплять рукав 7 (рис. 27) чи гнучку композитну трубу. Барабан із намотаним рукавом чи гнучкою композитною трубою поміщають у герметичну циліндричну камеру 1. Тоді подають компресором 4 повітря в запоршневий простір, і поршень 10 протягує рукав 7 чи гнучку композитну трубу трубопроводом, який містить дефектний відвід 11.



1 – герметична циліндрична камера; 2 – манометр; 3 – витратомір; 4 – компресор;
 5 – фланець; 6 – сталевий трубопровід; 7 – протягуваний рукав; 8 – оголовок;
 9 – тяга; 10 – поршень; 11 – відвід

Рисунок 27 – Експериментальна установка для досліджень динаміки протягування поршнем рукава сталевим трубопроводом, який містить відвід

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі отримано вирішення важливої науково-технічної проблеми оцінювання енерговитратності та забезпечення працездатності складних трубопровідних систем, яке ґрунтується на закономірностях впливу геометричних параметрів їх фасонних елементів, напрямків руху потоків (для трійників), режимних параметрів транспортування та концентрації і характеристик дисперсних фаз на газодинамічні процеси, структуру однофазних і багатofазних потоків, місцезоташування й інтенсивність ерозійного зношування та напружено-деформований стан. Основні результати роботи зводяться до наступного.

1. У результаті аналізу сучасних тенденцій встановлено, що практично всі аналітичні, чисельні або експериментальні дослідження в літературних джерелах стосуються окремих процесів, які відбуваються в фасонних елементах трубопроводів – чи то газодинамічних, чи ерозійного зношування або напружено-деформованого стану. Синергія цих процесів, поєднання їх в єдину цілісну фізичну картину на сьогодні не здійснені. У багатьох випадках немає достатньо виразних фізичних уявлень про закономірності процесів, які відбуваються в елементах складних трубопровідних систем, їх вплив на стінку. Порівняно з однофазними потоками рівняння для визначення втрат гідравлічної енергії двофазних потоків в фасонних елементах трубопровідних систем в літературних джерелах надзвичайно складні, є наближеними через прийнятий ряд припущень, не враховують структури двофазних потоків, нерівномірний розподіл фаз тощо. Передбачення ерозійного зношування фасонних елементів складних трубопровідних систем недостатньо вивчена на сьогодні задача. Геометрична форма ерозійних, корозійних дефектів у дослідженнях напружено-деформованого стану фасонних елементів надзвичайно спрощена (ідеалізована до сферичної чи прямокутної) і не відповідає реальній геометричній формі таких дефектів.

2. Визначено закономірності впливу режимних параметрів транспортування, концентрації та характеристик дисперсних фаз і геометричних параметрів фасонних елементів трубопровідних систем на газодинамічні процеси, структуру одно- та двофазних потоків у їх внутрішній порожнині, втрати гідравлічної енергії. Із трійників найменш енерговитратним є штаповані трійники, в яких відношення радіуса відборткування до зовнішнього діаметра відгалуження перевищує 0,25. Найбільші втрати гідравлічної енергії спостерігались у фасонних елементах, встановлених у місцях найменших тисків у трубопроводі. Найсуттєвіший вплив об'ємної частки дисперсної фази на втрати гідравлічної енергії спостерігався у відводах трубопровідних систем із великим кутом і малим радіусом вигину та трійниках із найменшим радіусом відборткування або його відсутністю (зварні трійники). У відводах газопроводів із кутом вигину 90° втрати тиску двофазних потоків (за досліджуваних параметрів потоку) були втричі більшими, ніж у відводах з кутом вигину 30° , а у відводах із радіусом вигину, рівним DN – вдвічі більші, ніж у відводах із радіусом вигину $3,5$ DN. Отримано емпіричні залежності для визначення коефіцієнтів місцевих опорів, втрати тиску двофазних потоків у фасонних елементах трубопровідних систем.

3. Показано, що ключем до розуміння процесів ерозійного зношування фасонних елементів складних трубопровідних систем є визначення та дослідження траєкторій руху ними дисперсних частинок, виявлення місць інтенсивного ударяння дисперсної фази в стінку фасонних елементів, визначення швидкості діаметрів дисперсних частинок, кутів атаки в місці вдаряння. Визначено закономірності впливу геометричної форми, напрямків руху двофазного потоку фасонними елементами трубопровідних систем на траєкторії руху дисперсних фаз такими елементами, перерозподіл швидкостей та розмірів дисперсних фаз. Виявлено місця інтенсивного ударяння дисперсної фази до стінки фасонних елементів; визначено швидкість рідких і твердих частинок, кути атаки, діаметри крапель конденсату та твердих частинок у місці ударяння.

4. Експериментально та чисельним моделюванням визначено місцезнаходження максимального ерозійного зношування фасонних елементів трубопровідних систем. Визначено закономірності впливу режимних параметрів транспортування, характеристик дисперсних фаз, геометричних параметрів фасонних елементів і напрямків руху ними потоків (для трійників) на місцезнаходження і інтенсивність їх ерозійного зношування. Визначальними чинниками, які суттєво впливають на величину ерозійного зношування відводів трубопроводів, є швидкість багатозфазного потоку, діаметр відводу і діаметр дисперсних частинок (при збільшенні діаметра дисперсних частинок від 0,005 мм до 1,0 мм максимальна швидкість ерозійного зношування відводів збільшується в 70 разів, а при збільшенні швидкості газового потоку від 4 м/с до 19 м/с – в 35 разів). Відводи газопроводу з кутом вигину 90° у 2,5 рази швидше ерозійно зношуються порівняно з відводом із кутом вигину 30° , а відводи з радіусом вигину рівним DN – у 9,8 разів швидше, ніж відводи із радіусом вигину $3,5 DN$. Заміна відводу трубопроводу з кутом вигину 90° на два відводи з кутом вигину 45° дозволяє вдвічі зменшити інтенсивність ерозійного зношування. Отримано нову емпіричну залежність між інтенсивністю ерозійного зношування відводів трубопроводів та основними параметрами процесу.

5. Поставлена та розв'язана математичним і чисельним моделюванням задача впливу ерозійних дефектів фасонних елементів трубопроводів на їх напружено-деформований стан. Розроблена методика та виконане комплексне тривимірне чисельне моделювання напружено-деформованого стану елементів трубопровідних систем складної геометричної форми з урахуванням газодинамічних процесів, які відбуваються у їхній внутрішній порожнині (нерівномірного розподілу тиску), температурного перепаду та складної тривимірної геометричної форми ерозійних дефектів стінки, яка змінювалась відповідно до швидкості ерозійного зношування. Базуючись на результатах моделювання процесів ерозійного зношування фасонних елементів трубопроводів, розроблено алгоритм тривимірного моделювання ерозійних дефектів їх стінки. Визначено закономірності впливу величини ерозійних дефектів на напружено-деформований стан фасонних елементів трубопроводів.

Математичним моделюванням отримано розрахункову залежність для визначення номінальних кільцевих напружень, які виникають у місці дефектів стінки відводу трубопроводу під дією основного силового навантаження (внутрішнього тиску). Її доцільно застосовувати, якщо фактична товщина стінки

тороподібних відводів трубопроводу в місці максимального ерозійного зношування перевищує 70 % їх номінальної товщини стінки. Розроблено науково-методичні підходи, покроковий алгоритм визначення допустимої глибини ерозійних дефектів фасонних елементів трубопроводів, оцінювання міцності таких елементів.

6. Теоретично й експериментально отримано наукове обґрунтування можливості застосування поршня, як тягового засобу, для безтраншейної реконструкції складних трубопровідних систем рукавом при відновленні їх працездатності, що на сьогодні не можливо виконати жодним із існуючих методів. Таке обґрунтування є новим перспективним досягненням, реалізація якого вносить значний вклад у науково-технічний прогрес у сфері безтраншейної реконструкції складних трубопровідних систем. Визначено закономірності зміни тиску на виході компресора під час виконання таких робіт. Тиск необхідний для протягування поршнем рукава трубопроводом довжиною 100 м та внутрішнім діаметром 49 мм, який містить у середній частині відвід із кутом вигину 90° , склав 0,29 МПа. Зі зменшенням кута вигину відводу тиск на виході компресора, необхідний для протягування рукава, зменшується, для кута вигину 30° він склав 0,2 МПа. Розроблено науково-практичні заходи з забезпечення працездатності ерозійно чи корозійно зношених відводів трубопроводів. Результати виконаних досліджень, розроблена техніка та технологія безтраншейного ремонту ерозійно чи корозійно зношених відводів трубопроводів промислово апробовані та впроваджені в СП “Київські теплові мережі” КП “Київтеплоенерго” РТМ “Печерськ”.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації

1. Numerical simulation of the stress state of an erosion-worn tee of the main gas pipeline / **Ya. Doroshenko**, V. Zapukhliak, Ya. Grudz, L. Poberezhny, A. Hrytsanchuk, P. Popovych, O. Shevchuk // *Archives of Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 101, No 2. P. 63–78. (індексується в Scopus).

2. Modeling computational fluid dynamics of multiphase flows in elbow and T-junction of the main gas pipeline / **Ya. Doroshenko**, Ju. Doroshenko, V. Zapukhliak, L. Poberezhny, P. Maruschak // *Transport*. 2019. Vol. 34, No 1. P. 19–29. (індексується в Scopus).

3. **Doroshenko Ya.**, Rybitskyi I. Investigation of the influence of the gas pipeline tee geometry on hydraulic energy loss of gas pipeline systems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 1, No 8 (103). P. 28–34. (індексується в Scopus).

4. **Doroshenko Ya. V.**, Oliynyk A. P., Karpash O. M. Modeling of stress-strain state of piping systems with erosion and corrosion wear. *Physics and chemistry of solid state*. 2020. Vol. 21, No 1. P. 151–156. (індексується в Scopus, Web of Science Core Collection).

5. Development of trenchless technology of reconstruction of “Pulling pig P” pipeline communications / **Ya. Doroshenko**, V. Zapukhliak, K. Poliarush, R. Stasiuk,

S. Bagriy // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 2, No. 1(98). P. 28–38. **(індексується в Scopus)**.

6. Developing a set of measures to provide maximum hydraulic efficiency of gas gathering pipelines / V. B. Volovetskyi, A. V. Uhrynovskyi, **Ya. V. Doroshenko**, O. M. Shchyrba, Yu. S. Stakhmych // *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. 2020. Vol. 101, Issue 1, July. P. 27–41. **(індексується в Scopus)**.

7. **Doroshenko Ya. V.**, Karpash O. M., Rybitskyi I. V. Investigation of dispersed contaminates influence on the hydraulic energy consumption of elements of gas pipeline systems with complex geometry. *Topical scientific researcher into resource-saving technologies of mineral mining and processing* : multi-authored monograph. Sofia, 2020. P. 182–207. **(розділ у колективній монографії іноземного видання)**.

8. **Doroshenko Ya. V.** Investigation of strength of shaped elements of the main gas pipeline. *Journal of Hydrocarbon Power Engineering*. 2019. Vol. 6, Issue 1. P. 14–21. **(наукове фахове видання України)**.

9. **Дорошенко Я. В.** Дослідження впливу геометричних параметрів відводів газопроводів на внутрішньотрубні ерозійні процеси. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2020. № 1(74). С. 7–17. **(наукове фахове видання України)**.

10. **Дорошенко Я. В.** Розроблення технології ремонту фасонних елементів трубопроводних систем у важкодоступних місцях. *Нафтогазова енергетика*. 2020. № 1 (33). С. 36–46. **(наукове фахове видання України)**.

11. **Дорошенко Я. В.** CFD-дослідження газодинамічних процесів у зварних трійниках магістральних газопроводів. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Технічні науки*. 2020. Том 31(70), № 1, Частина 2. С. 27–33. **(наукове фахове видання України)**.

12. **Дорошенко Я. В.** Дослідження впливу параметрів двофазних потоків на ерозійне зношування відводів газопроводів. *Комунальне господарство міст*. 2020. Том 1, Вип. 154. С. 240–247. **(наукове фахове видання України)**.

13. **Дорошенко Я. В.** Моделювання витікань газу з газопроводів в аварійних ситуаціях. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2020. № 3 (150). С. 22–28. **(наукове фахове видання України)**.

14. **Дорошенко Я. В.**, Карпаш О. М., Гожаєв Б. Н. Дослідження складу трубопроводних газорідних потоків та впливу наявних у них шкідливих домішок на режими перекачування, енерговитрати на транспортування. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2019. № 4(73). С. 35–45. **(наукове фахове видання України)**.

15. Сучасні технології будівництва промислових газонафтопроводів / **Я. В. Дорошенко**, В. А. Кучерявий, Н. М. Андрійшин, С. М. Стецюк, Ю. М. Левкович // *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2019. № 3(72). С. 19–31. **(наукове фахове видання України)**.

16. **Дорошенко Я. В.**, Поляруш К. А., Запхляк В. Б. Експериментальні дослідження динаміки безтраншейної реконструкції трубопроводних комунікацій

технологією “Тяговий поршень[Ⓣ]”. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2019. № 1(70). С. 25–32.

17. **Дорошенко Я. В.**, Поляруш К. А., Запужляк В. Б. Розроблення технології безтраншейної реконструкції трубопроводних комунікацій очисним поршнем. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2018. № 3(68). С. 12–19. **(наукове фахове видання України)**.

18. The study of the stress-strain state of trunk gas pipeline sections with defects in the shape of the cross-section of the pipe / **Ya. V. Doroshenko**, L. D. Pylypiv, K. A. Poliarush, Yu. I. Doroshenko // *Journal of Hydrocarbon Power Engineering*. 2017. Vol. 4, Issue 2. P. 68–80. **(наукове фахове видання України)**.

19. Дослідження фізичної картини руху газових потоків відводами магістральних газопроводів / **Я. В. Дорошенко**, В. Б. Запужляк, Ю. І. Дорошенко, Н. М. Запужляк // *Нафтогазова галузь України*. 2017. № 5(29). С. 25–29. **(наукове фахове видання України)**.

20. **Doroshenko Ya. V.**, Marko T. I., Doroshenko Yu. I. The study of erosive wear of the shaped elements of compressor station manifold of a gas pipeline. *Journal of Hydrocarbon Power Engineering*. 2016. Vol. 3, Issue 2. P. 65–78. **(наукове фахове видання України)**.

21. Експериментальні дослідження ерозійного зношування фасонних елементів трубопроводів / **Я. В. Дорошенко**, В. Б. Запужляк, Т. І. Марко, Р. Б. Стасюк // *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2017. № 1(62). С. 66–76. **(наукове фахове видання України)**.

22. **Дорошенко Я. В.**, Марко Т. І., Дорошенко Ю. І. Дослідження динаміки руху газу фасонними елементами обв'язки компресорної станції. *Науковий вісник*. 2016. № 1(40). С. 57–71. **(наукове фахове видання України)**.

23. Марко Т. І., **Дорошенко Я. В.** Механізми ерозійного зношування стінки труби газопроводів. *Прикарпатський вісник НТШ. Число*. 2015. № 1(29). С. 315–326. **(наукове фахове видання України)**.

24. Сучасні технології безтраншейного ремонту теплогазових мереж / К. А. Поляруш, **Я. В. Дорошенко**, С. І. Тихонов, А. Р. Бабій // *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2016. № 1(58). С. 41–51. **(наукове фахове видання України)**.

25. Тихонов С. І., **Дорошенко Я. В.**, Поляруш К. А. Технології внутрішньотрубного обстеження та ремонту важкодоступних ділянок газонафтопроводів. *Науковий вісник*. 2015. № 1(38). С. 83–94. **(наукове фахове видання України)**.

26. Марко Т. І., **Дорошенко Я. В.** Ерозійне зношування фасонних елементів газопроводів. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2014. № 4(53). С. 153–159. **(наукове фахове видання України)**.

27. **Дорошенко Я. В.**, Марко Т. І., Тихонов С. І. Сучасні технології обслуговування, ремонту та реконструкції підводних газонафтопроводів. *Науковий вісник*. 2014. № 1(36). С. 118–131. **(наукове фахове видання України)**.

28. Аналіз причин зниження гідравлічної ефективності міжпромислових газопроводів та вибір способів її підвищення / В. Б. Воловецький, О. М. Щирба,

О. Ю. Витязь, **Я. В. Дорошенко** // *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2013. № 3(48). С. 147–156. (**наукове фахове видання України**).

29. **Дорошенко Я. В.**, Дорошенко Ю. І. Дослідження впливу руху поршня на надійність балкового переходу прокладеного за схемою пружновикривленого трубопроводу. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2011. № 3(40). С. 34–36. (**наукове фахове видання України**).

30. **Дорошенко Я. В.**, Дорошенко Ю. І., Тихонов С. І. Застосування сучасних програмних комплексів комп'ютерного моделювання для підвищення якості проектування та спорудження трубопроводів. *Науковий вісник ІФНТУНГ*. 2010. № 2(24). С. 117–120. (**наукове фахове видання України**).

31. **Дорошенко Я. В.**, Дорошенко Ю. І. Міцність криволінійних ділянок трубопроводів. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2010. № 2(35). С. 112–116. (**наукове фахове видання України**).

Патенти

32. Пристрій для безтраншейної реконструкції трубопровідних комунікацій: пат. 129088 Україна: МПК F16L1/028. № u 201802905; заявл. 22.03.2018; опубл. 25.10.2018, Бюл. № 20. 3 с. Автори: **Дорошенко Я. В.**, Поляруш К. А., Запухляк В. Б. (**патент на корисну модель**).

33. Пристрій для санації трубопроводів рукавом: пат. 134600 Україна: МПК F16L1/028. № u 201812689; заявл. 20.12.2018; опубл. 27.05.2019, Бюл. № 10. 3 с. Автори: **Дорошенко Я. В.**, Поляруш К. А. (**патент на корисну модель**).

Праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

34. **Дорошенко Я. В.**, Карпаш О. М., Олійник А. П. Математичне і чисельне моделювання напружено-деформованого стану ерозійно зношених елементів трубопровідних систем складної геометричної форми. *Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні. ІТММ'2020* : тези доп. Міжнар. наук.-техн. конф. імені професора Михальова О.І., м. Дніпро, 17–19 березня 2020 р. Дніпро, 2020. С. 143–147.

35. **Дорошенко Я. В.** CFD аналіз впливу геометричних параметрів трійників на гідравлічну енерговитратність трубопровідних систем. *Теоретичні та практичні аспекти розвитку науки та освіти (частина I)* : матеріали Міжнар. наук.-практ. конф., м. Львів, 22–23 січня 2020 р. Львів, 2020. С. 55–58.

36. Дорошенко Ю. І. **Дорошенко Я. В.** Дослідження іноземного досвіду визначення втрат газу через наскрізні дефекти магістрального газопроводу. *Topical issues of the development of modern science* : abstracts of V International scientific and practical conf., с. Sofia, 15–17 January 2020 у. Sofia, 2020. P. 421–430.

37. Дослідження ерозійного зношування та міцності відводів магістральних газопроводів / **Я. В. Дорошенко**, В. Б. Запухляк, Л. Я. Побережний [та ін.] // *Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи його діагностування і прогнозування* : праці VI Міжнар. наук.-техн. конф., м. Тернопіль, 24–27 вересня 2019 р. Тернопіль, 2019. С. 153–156.

38. **Дорошенко Я. В.**, Поляруш К. А. Розроблення технології безтраншейної реконструкції трубопровідних комунікацій “Тяговий поршень[®]”. *Science progress in European countries: new concepts and modern solutions* : proceedings of 6th Inter. scient. conf., с. Stuttgart, 19 april 2019 у. Stuttgart, 2019. P. 139–151.

39. Огляд існуючих методів очищення та осушення газу на підприємствах газової галузі / Ю. І. Дорошенко, **Я. В. Дорошенко**, В. Б. Михалків, М. Т. Лушпак // *Наукова думка сучасності і майбутнього* : збірн. статей учасників восьмої Всеукраїнської практично-пізнавальної конф., м. Дніпро, 30 січня – 7 лютого 2017 р. Дніпро, 2017. С. 46–49.

40. **Дорошенко Я. В.**, Поляруш К. А. Метод безтраншейного релейнінгу теплогазових мереж. *Нафтогазова енергетика-2017* : тези доп. 6-тої Міжнар. наук.-техн. конф., м. Івано-Франківськ, 15–19 травня 2017 р. Івано-Франківськ, 2017. С. 196–197.

41. **Дорошенко Я. В.**, Марко Т. І., Дорошенко Ю. І. Дослідження фізичної картини руху газових потоків трійниками магістральних газопроводів. *Нафтогазова енергетика-2017* : тези доп. 6-тої Міжнар. наук.-техн. конф., м. Івано-Франківськ, 15–19 травня 2017 р. Івано-Франківськ, 2017. С. 195–196.

42. **Дорошенко Я. В.**, Зінич А. І. CFD Моделювання роботи циклонних пиловловлювачів магістральних газопроводів. *Нафтогазова енергетика-2017* : тези доп. 6-тої Міжнар. наук.-техн. конф., м. Івано-Франківськ, 15–19 травня 2017 р. Івано-Франківськ, 2017. С. 206–207.

43. **Дорошенко Я. В.**, Марко Т. І., Дорошенко Ю. І. Комп’ютерне моделювання ерозійного зношування відводів лінійної частини магістрального газопроводу. *Актуальні проблеми енергетики та екології* : матеріали XVI Всеукраїнської наук.-техн. конф., м. Одеса, 5–8 жовтня 2016 р. Одеса, 2016. С. 85–88.

44. **Дорошенко Я. В.**, Марко Т. И., Дорошенко Ю. И. Компьютерное моделирование динамики движения газа фасонными элементами линейной части газопроводов. *Трубопроводный транспорт – 2016* : материалы XI Междунар. учеб.-науч.-практ. конф., г. Уфа, 24–25 мая 2016 г. Уфа, 2016. С. 60–61.

45. **Дорошенко Я. В.**, Дорошенко Ю. І. Проблеми і перспективи спорудження та ремонту підводних газонафтопроводів. *Проблеми і перспективи транспортування нафти і газу* : матеріали Міжнар. наук.-техн. конф., м. Івано-Франківськ, 15–18 травня 2012 р. Івано-Франківськ, 2012. С. 2006–2008.

Опубліковані праці, які додатково відображають наукові результати дисертації

46. ДСТУ 9003:2020 Технологія будівництва магістральних і промислових трубопроводів із гнучких композитних труб. Загальні технічні вимоги. Вид. офіц. Київ : ДП УкрНДНЦ, 2020. 66 с. Автори: **Дорошенко Я. В.**, Кучерявий В. А., Литвин В. Л., Підзирайло О. М.

47. Грудз В. Я., **Дорошенко Я. В.**, Запухляк В. Б. Галузева методика. Технічне діагностування, розрахунок міцності фасонних елементів трубопровідних систем. Затверджено 27.07.2020. Київ : НВЦТД "Техдіагаз", 2020. 42 с.

48. Грудз В. Я., Запхляк В. Б., **Дорошенко Я. В.**, Верхоляк Ю. Ю. Методика та розрахунок напружено-деформованого стану балкових систем надземних переходів. Затверджено 29.05.2020. Івано-Франківськ : ТОВ "ЕКСПРЕС-ГАЗБУД", 2020. 53 с.

49. **Doroshenko Y. V.** Gas and Oil Pipeline Valve, Pig Launcher & Receiver. Saarbrucken. Germany : LAP Lambert Academic Publishing, 2016. 132 p. ISBN 978-3-659-94320-1.

50. **Doroshenko Y. V.** Gas and Oil Pipeline Bridges, Road and Railway Crossings. Saarbrucken. Germany : LAP Lambert Academic Publishing, 2015. 157 p. ISBN 978-3-659-69018-1.

51. **Дорошенко Я. В.** Спорудження та ремонт зосереджених об'єктів газонафтопроводів : підручник. Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2015. 845 с. ISBN 978-3-659-37720-4.

52. **Дорошенко Я. В.** Спорудження магістральних трубопроводів : навчальний посібник. Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2010. 563 с. ISBN 978-966-694119-3.

53. Дорошенко Ю. І., Михалків В. Б., **Дорошенко Я. В.** Розробка проектних рішень для зменшення втрат тиску у газових мережах із поліетиленових труб. *Питання розвитку газової промисловості України*. 2011. Вип. 39. С. 258–263.

54. **Дорошенко Я. В.**, Марко Т. І., Дорошенко Ю. І. Дослідження динаміки руху багатофазних потоків фасонними елементами обв'язки компресорної станції магістрального газопроводу. *Міжнародний науковий журнал*. 2016. № 7. С. 68–77.

АНОТАЦІЯ

Дорошенко Я. В. Наукові основи оцінювання енерговитратності та забезпечення працездатності складних трубопровідних систем. – 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, 2020.

Дисертаційна робота присвячена дослідженню динаміки руху однофазних і багатофазних потоків фасонними елементами складних трубопровідних систем. Визначенню закономірностей впливу режимних параметрів транспортування, характеристик дисперсних фаз, їх концентрації, геометричних параметрів досліджуваних елементів на енерговитратність, ерозійне зношування фасонних елементів. Комплексному дослідженню напружено-деформованого стану фасонних елементів трубопровідних систем із урахуванням закономірностей газодинамічних процесів, які відбуваються в їхній внутрішній порожнині, закономірностей ерозійного зношування стінки. Визначенню закономірностей технологічного процесу протягування поршнем рукава в трубопровід, який містить дефектні фасонні елементи, розробленню технології безтраншейної реконструкції складних трубопровідних систем.

У дисертаційній роботі отримано емпіричні залежності для визначення коефіцієнтів місцевих опорів, втрати тиску двофазних потоків у внутрішній порожнині фасонних елементів, визначення інтенсивності ерозійного зношування таких елементів. За результатами чисельних і експериментальних досліджень визначено місцезнаходження максимального ерозійного зношування фасонних елементів трубопроводних систем. Розроблено алгоритм тривимірного моделювання ерозійних дефектів стінки фасонних елементів.

Ключові слова: енерговитратність, газодинамічний процес, ерозійне зношування, напружений стан, ремонт, фасонні елементи, відвід, трійник, CFD моделювання, дисперсна фаза, підхід Ейлера, підхід Лагранжа, рівняння Фінні, рукав, траєкторія руху.

АННОТАЦИЯ

Дорошенко Я. В. Научные основы оценки энергозатратности и обеспечения работоспособности сложных трубопроводных систем. – Квалификационная научный труд на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.15.13 – трубопроводный транспорт, нефтегазохранилища. – Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, МОН Украины, Ивано-Франковск, 2020.

Диссертационная работа посвящена исследованию динамики движения однофазных и многофазных потоков фасонными элементами сложных трубопроводных систем. Определению закономерностей влияния режимных параметров транспортировки, характеристик дисперсных фаз, их концентрации, геометрических параметров исследуемых элементов на энергозатратность, эрозионный износ фасонных элементов. Комплексному исследованию напряженно-деформированного состояния фасонных элементов трубопроводных систем с учетом закономерностей газодинамических процессов, которые происходят в их внутренней полости, закономерностей эрозионного износа стенки. Определению закономерностей технологического процесса протягивания поршнем рукава в трубопровод, содержащий дефектные фасонные элементы, разработке технологии бестраншейной реконструкции сложных трубопроводных систем.

В диссертационной работе получены эмпирические зависимости для определения коэффициентов местных сопротивлений, потери давления двухфазных потоков во внутренней полости фасонных элементов, определения интенсивности эрозионного износа таких элементов. По результатам численных и экспериментальных исследований определено местонахождение максимального эрозионного износа фасонных элементов трубопроводных систем. Разработан алгоритм трехмерного моделирования эрозионных дефектов стенки фасонных элементов.

Ключевые слова: энергозатратность, газодинамический процесс, эрозионный износ, напряженное состояние, ремонт, фасонные элементы, отвод, трійник, CFD

моделирование, дисперсная фаза, подход Эйлера, подход Лагранжа, уравнения Финни, рукав, траектория движения.

ANNOTATION

Doroshenko Ya. V. Scientific bases of assessing the energy consumption and ensuring the efficiency of complex pipeline systems. – 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, Ivano-Frankivsk, Ministry of Education and Science of Ukraine, 2020.

Gas-dynamic processes, the structure of single-phase flows in the inner cavity of shaped elements of pipeline systems were investigated, regularities between the processes under study were established. The places of branches and tees where the flow rate, pressure reached maximum, minimum values, places of vortex formation, recirculation were determined, the values of the flow rate and pressure in these places were determined.

The influence regularities of the flow direction in the tees, the peculiarities of their geometric shape, the diameter of the tees branch on the gas-dynamic processes in their inner cavity, the energy consumption of the tees were investigated. Equations were obtained for calculating the coefficients of local resistances of tees, depending on their geometric parameters. It was recommended that for the design of new and reconstruction of old gas pipeline systems, the stamped tees should be selected, in which the flanging radius is greater than 0.25.

The Euler approach (Mixture model) was used for investigation of gas-dynamic two-phase processes, energy losses of two-phase flows in shaped elements of pipeline systems. The distribution of the volume fraction of the continuous and dispersed phases, the pressure in the inner cavity of the shaped elements of pipelines was studied. The influence regularities for operational parameters of transportation, characteristics and volume fraction of dispersed phases and geometric parameters of the investigated elements on their hydraulic energy consumption were determined. A significant dependence of the value of the energy loss of a two-phase flow in shaped elements of pipelines on the volume fraction of dispersed phases was established. Empirical dependences for determining the pressure loss of two-phase flows in the shaped elements of pipeline systems are obtained.

The Lagrangian approach (Discrete Phase Model) was used for performing the three-dimensional modelling of multiphase flows movement in shaped elements of pipeline systems. The distribution of the velocity and size of dispersed phases in their inner cavity was determined. The trajectories of movement of dispersed phases by shaped elements were investigated, the places of their intense impact to the wall, the places of their turbulence, changes in the direction of movement were investigated. The speed, angles of attack, diameters of dispersed phases in the place of impact to the wall of shaped elements were determined. The influence regularities of flow directions in the tees, the geometric parameters of the shaped elements of the pipelines, the regime parameters of

transportation on the trajectory of dispersed phases movement by the shaped elements were determined.

Numerical modelling (Finney's model) was used for experimental investigation of the erosion wear of shaped elements of pipeline systems. The places of concentration of dispersed phases on their walls, places of intense erosive wear, and the rate of wall thinning were determined. The places of erosion wear of the shaped elements of the pipelines were experimentally found and the reliability of the modelling was confirmed. The influence regularities of the velocity and diameter of dispersed phases, angles of attack, concentration of the dispersed phase on the wall on the location and value of erosion wear of shaped elements were determined. The dependence of the location and value of erosion wear of pipeline bends on their diameter, angle and bend radius, two-phase flow rate, size and flow rate of dispersed phases were studied. A new empirical relationship between the intensity of erosion wear of pipeline bend and the main process parameters is obtained.

The stress-strain state of shaped elements of pipeline systems was investigated taking into account the regularities of gas-dynamic processes that occurred in their inner cavity, erosional wear of the wall and temperature drop. Areas of potential risk of strength loss in shaped elements of pipeline systems were determined. Geometric models of shaped elements of pipelines with a complex three-dimensional shape of erosional wall defects were elaborated. The influence regularities of the magnitude of erosion defects on the stress-strain state of pipelines shaped elements was determined.

The stress-strain state of erosion and corrosion worn out pipeline bends was mathematically described. The problem was solved in a toroidal coordinate system. The system of equilibrium equations in the framework of the linear theory of torsion was reduced to one equation, which was the basic equation of the Lamé problem. A formula for calculating the circumferential stresses in the wall of erosion or corrosion worn out pipelines caused by the effect of internal pressure was obtained. The influence regularities of changes in the wall thickness of pipe bends in place of their erosion wear on the value of equivalent stresses were determined. It was found that the obtained formula for calculating circumferential stresses could be used when the actual wall thickness of the bend at the point of maximum erosive wear did exceed 70 % of its nominal wall thickness.

It was proposed to repair pipelines with erosion or corrosively worn bends in hard-to-reach places by trenchless methods by pulling a hose or flexible composite pipes with a pig. The possibility of implementing such an idea is theoretically justified. The regularities of the technological process of pulling the hose by the pig through the pipeline, which contains a defective bend, were determined and experimentally confirmed.

Key words: energy loss, gas-dynamic process, erosion wear, stress-strain state, repair, shaped elements, bend, tee, CFD modelling, dispersed phase, Euler approach, Lagrange approach, Finney equation, hose, movement trajectory.