

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

**Запухляк Василь Богданович**



УДК 622.691.4

**ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ РІЗНОВЕКТОРНОЇ ГАЗОТРАНСПОРТНОЇ**  
**СИСТЕМИ ЗА УМОВИ ОБМЕЖЕНИХ ОБСЯГІВ ТРАНЗИТУ**

Спеціальність 05.15.13 – трубопровідний транспорт, нафтогазосховища

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

**Івано-Франківськ – 2021**

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 Володимир Ярославович,**  
Івано-Франківський національний технічний  
університет нафти і газу, професор кафедри  
газонафтопроводів та газонафтосховищ.

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Фик Ілля Михайлович,**  
Національний технічний університет «Харківський  
політехнічний інститут», м. Харків, завідувач  
кафедри видобування нафти, газу та конденсату;

доктор технічних наук, професор  
**Тіглов 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 12 травня 2021 року о 9 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 10 квітня 2021 року.

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



А. П. Джус

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** До трубопровідних систем з транспортування газу ставляться такі вимоги як: максимальна надійність, мінімальна енерговитратність та екологічна безпека. Ці показники залежать від якості проектування, спорудження та ремонту трубопроводів, ефективності технічного обслуговування, правильності вибору режимів експлуатування, оцінки технічного стану та прогнозування довговічності.

Газотранспортний комплекс України являє собою одну з найскладніших систем магістральних газопроводів в Євразії. Тому його експлуатація вимагає наукового підходу до проблем енергоефективності та надійності. На сьогодні газотранспортна система (ГТС) знаходиться в працездатному технічному стані, у зв'язку з чим може бути досягнена проектна пропускна здатність при екстремальному використанні всіх потужностей системи. Однак, через обмеження газопостачання, продуктивність системи знизилась до (100–120) млн. м<sup>3</sup> за добу, що складе (36–55) млрд. м<sup>3</sup> за рік. Такі умови транспортування газу вважаються неповним завантаженням газотранспортної системи або умовами обмеженого транзиту.

При неповному завантаженні ГТС, появляється множина допустимих режимів її експлуатації і, в залежності від вибору найбільш раціонального з них, можна мінімізувати енерговитрати на транспортування газу. Ці енерговитрати пов'язані з використанням великих об'ємів паливного газу через відносно низький коефіцієнт корисної дії газоперекачувальних агрегатів (ГПА), як теплових двигунів. Тому, один зі шляхів зменшення витрат полягає у виключенні з роботи окремих ГПА на компресорних станціях (КС) чи в зупинці цілих КС. Розрахунковим шляхом можна встановити режим роботи ГТС з певним відключенням КС, при якому продуктивність системи буде дорівнювати заданій. Загальна кількість відключених агрегатів при такому режимі визначить економію паливного газу. Іншим аспектом економії енерговитрат на транспортування газу, в умовах неповного завантаження, є зменшення гідравлічних втрат тиску в газопроводах за рахунок перекачування при високих робочих тисках.

Поряд з ефективністю використання системи магістральних газопроводів виникають проблеми забезпечення надійності її роботи. Тому, при виборі режимів експлуатації ГТС, в умовах обмеженого транзиту, слід враховувати показники надійності її складових елементів (КС та ділянок лінійної частини газопроводів). При виборі ГПА чи КС для відключення потрібно враховувати тривалість нестационарного процесу та величину зниження продуктивності системи, що спричинені їх зупинкою, а також необхідно оцінювати реальний технічний стан кожного ГПА і КС, прогнозувати їх залишковий ресурс та ймовірність безвідмовної роботи. При експлуатації газопроводів на високих робочих тисках, також слід дослідити вплив їх значень на показники надійності лінійної частини.

Очевидно, що при зменшенні обсягів транзиту газотранспортною системою України, окремі ділянки лінійної частини газопроводів можуть бути виведені з

експлуатації. Тут також слід провести оцінювання окремих ділянок газопроводів за показниками надійності, щоб забезпечити транзит і постачання газу внутрішньому споживачеві більш надійними газопроводами, з урахуванням напрямків постачання та проведенням їх диверсифікації. А, враховуючи тривалість експлуатації газотранспортної системи України, потрібно вивчити можливі способи підвищення надійності її експлуатації при виконанні різного виду ремонтних робіт.

Крім того, через мінливість ринку газу, необхідно забезпечити збережуваність відключених елементів газотранспортної системи, які в любий час можуть знадобитися при відновленні максимального завантаження системи. При цьому, слід вивчити можливості їх використання з іншою альтернативною метою та провести наукове вивчення тих проблем, які при цьому можуть виникати.

З огляду на окреслені вище проблеми сформульовано тему, мету та задачі дисертаційної роботи, які на сьогодні є актуальними і відповідають сучасним викликам, що з'являються перед галуззю трубопровідного транспорту газу.

**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 “Моніторинг технічного стану протяжних промислових об’єктів за складних умов експлуатування” (держбюджетна науково-дослідна тема ІФНТУНГ 2016–2018 рр., номер державної реєстрації 0116U006976).

Також дисертаційна робота виконана у відповідності з планом науково-дослідної роботи “Забезпечення роботоздатності та конкурентоспроможності ГТС з метою підвищення енергетичної безпеки України та Євросоюзу” (держбюджетна науково-дослідна робота ІФНТУНГ 2019–2020 рр., номер державної реєстрації 0119U002232) та науково-дослідної роботи “Підвищення рівня екологічної безпеки процесів видобування та транспортування енергетичних вуглеводнів” (Грант Національного фонду досліджень України 2020.01/0417 (2020-2021 рр.)).

**Мета і завдання дослідження.** Метою дисертаційної роботи є встановлення закономірностей протікання технологічних процесів в елементах складної газотранспортної системи для забезпечення надійності газопостачання, а також оптимізація їх обслуговування за критерієм енерговитратності на транспортування газу в умовах обмеженого транзиту.

Завдання дисертаційної роботи:

1. Дослідити закономірності зміни параметрів квазістаціонарних режимів роботи газотранспортної системи в умовах зменшення об’ємів перекачування газу, шляхом побудови і реалізації математичних моделей, для оперативного керування її експлуатацією.

2. Дослідити нестационарні процеси в газопроводах, що зумовлені стрибкоподібними змінами обсягів перекачування газу чи відключенням і повторним включенням компресорних станцій, з метою запобігання критичного перевищення тиску і порушення умов міцності трубопроводів.

3. Розробити принципи і комплекс методів оцінки впливу обмежених умов транзиту на вибір схем та режимів роботи газотранспортної системи, з урахуванням

чинника мінімізації енерговитрат при транспортуванні, та забезпечення надійності та ефективності роботи системи.

4. Оцінити можливість застосування стохастичних математичних моделей, з використанням в якості вихідної інформації передісторії експлуатації газоперекачувальних агрегатів на компресорних станціях, для визначення залишкового ресурсу роботи обладнання та показників надійності системи.

5. Встановити рівень оптимального співвідношення між енергозатратами та показниками надійності магістральних газопроводів, на основі створення та реалізації математичної моделі роботи системи газопроводів в умовах неповного завантаження з урахуванням їх реального стану.

6. Провести комплексне аналітичне та експериментальне дослідження впливу технологічних процесів ремонту газопроводів із застосуванням зварювання на надійність газопроводу.

7. Провести комплексний аналіз проблем, пов'язаних з переведенням непрацюючих чи недовантажених газопроводів на альтернативні види транспортованих середовищ, та розробити математичне забезпечення для оцінки можливості таких переведень.

**Об'єкт дослідження** – режими експлуатації газотранспортної системи, що працює в умовах обмеженого транзиту, експлуатаційна надійність та довговічність її складових та альтернативні способи використання виведених з експлуатації ділянок трубопроводів.

**Предмет дослідження** – оптимізація режимів експлуатації та процесів, пов'язаних з обслуговуванням та ремонтом газопровідних систем в умовах зменшення транзиту, надійність елементів системи трубопровідного транспорту газу в умовах неповного завантаження, оптимізація та надійність переведення непрацюючих та недовантажених елементів системи транспорту газу на транспортування інших альтернативних видів продукту.

**Методи дослідження.** Аналітичні дослідження режимів роботи складної газотранспортної системи в умовах неповного завантаження, яка містить ряд газопроводів, та ряд компресорних станцій, від характеристик яких залежить величина пропускної здатності. Методи математичного моделювання характеру протікання і тривалості нестационарних процесів, викликаних виключенням з режиму роботи окремих компресорних станцій, які базуються на основі класичних рівнянь газового потоку і нерозривності з використанням функцій джерела Дірака. Реалізація створених математичних моделей із застосуванням інтегральних перетворень Фур'є і Лапласа. Дослідження, пов'язані з прогнозуванням технічного стану і оцінюванням залишкового ресурсу газоперекачувальних агрегатів та компресорних станцій, на основі стохастичних математичних моделей. Методи статистичної обробки даних експериментальних досліджень, пов'язаних з експлуатацією трубопроводів в різних модельних середовищах та при транспортуванні різних середовищ. Теоретичні та експериментальні методи дослідження зміни властивостей трубопровідної сталі в умовах проведення

ремонтних робіт. Методи прогнозування режимів роботи газопроводів в умовах переведення їх на транспортування альтернативних видів продукту.

**Наукова новизна** полягає в подальшому розвитку методології комплексного дослідження режимів роботи складних газотранспортних систем в умовах неповного завантаження та їх впливу на надійність системи:

- вперше виконано дослідження нестационарних процесів в газопроводах, спричинених стрибкоподібними змінами обсягів перекачування газу чи зупинками і запусками компресорних станцій, з метою запобігання критичного перевищення тиску і порушення умов міцності трубопроводів;

- вперше розроблено принципи і методи оптимізації режимів роботи компресорних станцій в умовах неповного завантаження системи газопроводів, з урахуванням показників надійності;

- вперше запропоновано введення поняття “дефектний бал” та розроблена відповідна математична модель оцінки реального стану лінійних ділянок газопроводів, в процесі оптимізації газопровідних систем в умовах обмеженого транзиту;

- вперше встановлено закономірності зміни параметрів режиму роботи газопроводу під час закачування та транспортування середовищ відмінних від природнього газу ( $CO_2$ ,  $H_2$ ) на основі теоретичних досліджень;

- вперше встановлено закономірності зміни тиску на виході компресора під час протягування поршнем труби в трубі з використанням опорно-центрувальних кілець, що дає можливість підібрати обладнання для виконання робіт;

- вперше встановлено закономірності вимушених коливань надземної ділянки трубопроводу під час проходження механічних пристроїв по газопроводу (контейнерів чи ремонтних поршнів);

- набуло подальшого розвитку застосування для оперативного керування експлуатацією і режимами роботи газотранспортної системи, при зміні обсягів перекачування газу, методу інтегральних коефіцієнтів;

- набули подальшого розвитку методи дослідження напружено-деформованого стану лінійних ділянок газопроводів під час виконання ремонтних робіт з їх підсаджування;

- встановлені закономірності протікання процесів наводнювання та науглецювання металу під час виконання зварювально-відновлювальних робіт;

- експериментально досліджено місця інтенсивного ерозійного зношування фасонних елементів газопроводів та теоретично встановлено вплив режиму транспортування та характеристик дисперсних фаз на ці процеси.

**Практичне значення одержаних результатів.** Результати досліджень є корисними для прогнозування режимів роботи газопровідних систем в умовах неповного завантаження, а саме при виборі газоперекачувальних агрегатів, компресорних станцій чи лінійних ділянок газотранспортної системи для відключення та переведення чи часткового переведення на транспортування інших альтернативних видів продукту. Результати дослідження процесу відновлення проектного положення газопроводу методом підсаджування можуть бути

використані для розроблення нормативного документу з виконання такого виду ремонтних робіт. За результатами даного дослідження було розроблено “Рекомендації щодо проведення робіт із підсаджування газопроводу діаметром 1420 мм”.

Експериментальні дослідження ерозії фасонних елементів газопроводів лягли в основу комплексної галузевої методики “Технічне діагностування та розрахунок міцності елементів газопровідних систем складної геометричної форми”, яку впроваджено в Науково-виробничому центрі технічної діагностики “Техдіагаз” АТ “Укртрансгаз” НАК “Нафтогаз України”.

Дослідження процесів наводнювання та науглецювання трубних сталей дозволяють провести аналіз можливостей застосування запропонованих альтернативних способів використання газових магістралей. Поряд з цим запропоновано ряд можливих способів модернізації газопроводів під нові виклики, зокрема розроблено техніки та технології протягування труби в трубі та нанесення покриття на внутрішню поверхню трубопроводу за допомогою внутрішньотрубних снарядів.

Також, на основі результатів інших досліджень розроблено галузеві методики “Розрахунки розподілу потоків газу і визначення його запасів в трубах”, “Розрахунок напружено-деформованого стану складних систем надземних переходів”, “Розрахунок напружено-деформованого стану балкових систем надземних переходів”.

**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 виконано:

- дослідження характеру та тривалості нестационарних процесів в газопроводах за умов обмеженого транзиту, що викликані стрибкоподібною зміною витрати та зупинками окремих компресорних станцій [1-4];

- моделювання роботи газопроводів в умовах неповного завантаження для різних схем відключення компресорних станцій чи окремих агрегатів та, на основі аналізу режимів роботи, запропоновано вибір найоптимальніших з них при врахуванні показників надійності [1-7, 29-34];

- аналітичне моделювання вибору лінійних ділянок для відключення та переведення на інші альтернативні види транспортованого продукту із застосуванням ймовірнісних показників надійності [4-11];

- моделювання та експериментальне дослідження ерозійного зношування елементів трубопровідних систем складної геометричної форми, виявлення місць ерозійного зношування та дослідження корозійного впливу ґрунтових середовищ на зміну механічних властивостей трубних сталей [12-15, 35-38];

- математичне та числове моделювання напруженого стану трубопроводів під час виконання робіт з підсаджування [16-18, 38-48];

- моделювання процесів можливої зміни властивостей трубної сталі під час виконання ремонтних робіт та експериментальне дослідження ударної в'язкості сталі Х70 [19-22, 49, 50];

- математичне моделювання режимів роботи окремих ділянок газопроводів при альтернативному використанні їх для інших видів продукту [23-28, 51-59].

У наукових працях, опублікованих у співавторстві, дисертанту належить фактичний матеріал і основний творчий доробок. Автор виконав планування та усі експериментальні дослідження, здійснив аналіз їх результатів, брав безпосередню участь у впровадженні результатів дисертаційної роботи у виробництво. Усі наукові узагальнення, положення, результати, висновки та рекомендації, викладені у дисертації, виконані автором особисто.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення роботи викладено та 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.), VII-й Міжнародній навчально-науково-практичній конференції “Трубопровідний транспорт – 2012” (м. Уфа, 8-9 листопада 2012 р.), Міжнародній науково-технічній конференції “Нафтогазова енергетика 2013” (м. Івано-Франківськ, 7-11 жовтня 2013 р.), Міжнародній науково-технічній конференції “Нафтогазова освіта та наука стан та перспективи” (м. Івано-Франківськ, 10-12 грудня 2014 р.), XXVII-й Науковій сесії наукового товариства ім. Шевченка. (м. Івано-Франківськ, 3-22 березня 2016 р.), XI-й Міжнародній навчально-науково-практичній конференції “Трубопровідний транспорт – 2016” (м. Уфа, 24-25 травня 2016 р.), 2-й Міжнародній конференції “Інноваційні підходи і сучасна наука” (Київ, 31 травня 2016 р.), 6-й Міжнародній науково-технічній конференції “Нафтогазова енергетика 2017” (м. Івано-Франківськ, 15-19 травня 2017 р.), V-й Міжнародній науково-технічній конференції «Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи його діагностування і прогнозування» (м. Тернопіль, 19-22 вересня 2017 р.), XXIX-й Науковій сесії наукового товариства ім. Шевченка. (м. Івано-Франківськ, 5-27 березня 2018 р.), Міжнародній науково-технічній конференції до 100-річчя з дня заснування НАН України та на вшанування пам'яті Івана Пулюя (м. Тернопіль, 23-24 травня 2018 р.), Міжнародній науковій інтернет-конференції "Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення" (м. Тернопіль, 18 вересня 2018 р.), XXX-й Науковій сесії наукового товариства ім. Шевченка. (м. Івано-Франківськ, 28 лютого – 21 березня 2019 р.), I-й Міжнародній науково-технічній конференції “Перспективи розвитку машинобудування та транспорту – 2019” (м. Вінниця, 13-15 травня 2019 р.), Міжнародній конференції “Нафтогазова енергетика” (м. Івано-Франківськ, 27-31 травня 2019), Міжнародній конференції 6-th International Conference “FRACTURE MECHANICS OF MATERIALS AND STRUCTURAL INTEGRITY” (м. Львів, 3-6 червня 2019 р.), 6-й Міжнародній науково-технічній конференції “Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи його діагностування і прогнозування” (м. Тернопіль, 24-27 вересня 2019 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 2020-2021 роках.

**Публікації.** За темою дисертаційної роботи опубліковано 59 друкованих праць, з яких 7 – у міжнародних наукових журналах, що індексуються у наукометричних базах даних Scopus чи Web of Science, 20 – у наукових фахових виданнях, затверджених ДАК України, 1 – патент на корисну модель, 31 – теза доповідей на міжнародних та всеукраїнських конференціях.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота містить вступ, шість розділів, загальні висновки, список використаних джерел та п'ять додатків. Роботу викладено на 411 сторінках машинописного тексту. Робота містить 125 рисунків та 16 таблиць. Список використаних джерел містить 279 найменувань.

## 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** розглянуто перспективи споживання природного газу внутрішніми та зовнішніми споживачами та проведено аналіз основних напрямків його постачання. Проаналізовано структуру та потужності газотранспортної системи України, визначено мінімально необхідну кількість зовнішніх джерел постачання природного газу (що дорівнює шести), а також проведено аналіз літературних джерел, для вивчення існуючих досліджень режимів роботи ГТС в умовах неповного завантаження та встановлення основних принципів забезпечення надійної та ефективної роботи ГТС в таких умовах. Також проведено аналіз альтернативних способів використання незадіяних в транспортуванні газу активів ГТС.

Станом на сьогодні в Україну природний газ постачається з 4-ох зовнішніх джерел: з Росії – з метою транзиту до Європи, з Польщі, Словаччини та Угорщини – для внутрішнього споживача та з метою зберігання в Українських підземних сховищах, основні об'єми яких дислокуються на заході нашої держави. Отже, необхідна кількість джерел постачання природного газу не є достатньою.

Попри це, для забезпечення стабільної роботи ГТС за тими напрямками, що існують (аверсними чи реверсними), необхідно підтримувати її належний технічний стан. Саме тому питання, що стосуються забезпечення надійності ГТС в умовах обмеженого транзиту, є надзвичайно важливими. А саме, це: забезпечення безвідмовності, ремонтпридатності, довговічності та збережуваності системи. Кількісна оцінка надійності ГТС може бути проведена з використанням основних

теорем ймовірності за наведеними працями Грудза В. Я., Тимківа Д. Ф., Яковлева Є. І., Березіна В. Л., Расщепкіна К. Е. тощо.

Застосування наведених математичних підходів, при аналізі надійності роботи ГТС, можливе при використанні агрегативного підходу. Проте, такі моделі не завжди будуть ефективними при розрахунку показників надійності елементів ГТС в умовах неповного завантаження.

Враховуючи, що термін експлуатації 60-ти відсотків магістральних газопроводів складає набагато більше 33 років, внутрішньотрубне діагностування є необхідним засобом з підвищення їх надійності. А основним засобом з підвищення надійності магістральних газопроводів є капітальний ремонт. Слід відміти, що близько 90 відсотків ремонтних робіт не можуть обійтися без застосування дугового зварювання, режими якого мають свій вплив на надійність газопроводів через температурні та інші процеси в металі трубопроводу. Процесами розподілу температури в металі та вибору режимів зварювально-відновлювальних робіт займалися такі провідні вчені як Шлапак Л. С., Василик А. В., Гаген Ю. Г., Бут В. С., Недосека А. Я., Подстригач Я. С., Коляно Ю. М. та інші.

Що стосується дослідження режимів роботи газопроводів в умовах обмеженого транзиту, то ряд праць Крижанівського Є. І., Грудза В. Я., Середюк М. Д., Михалківа В. Б. присвячені аналізу пропускну здатності складних газопроводів в умовах різного з'єднання окремих ниток та при відключенні компресорних станцій чи окремих ГПА, а також вибору критеріїв оптимізації режимів роботи. Проте, не повністю досліджені проблеми забезпечення надійності ГТС при неповному її завантаженні.

Встановлено, що незадіяна частина ГТС України в майбутньому має перспективи, щодо забезпечення її збереженості з переходом частковим або повним на транспортування інших видів продукту. Проте, поряд з цим виникають ряд невирішених практичних та наукових задач, а саме: забезпечення працездатності основних фондів трубопровідних систем під впливом водневої деградації, яка є неминучою при збільшенні в транспортованому продукті концентрації водню; забезпечення захисту внутрішньої порожнини газопроводів від корозії, при заповненні їх повітрям чи вуглекислим газом; забезпечення міцності надземних переходів, при транспортуванні ними контейнерів вантажного типу з врахуванням динамічних характеристик їхнього руху.

На основі аналізу літературних джерел сформовані завдання дисертаційної роботи. Першочерговими є: розроблення енергоефективних режимів експлуатації магістральних газопроводів, з метою зменшення енерговитрат на транспортування газу в умовах зменшеного транзиту, з урахуванням їх впливу на показники надійності; розроблення стратегії оптимізації ГТС в цілому, з метою відключення та виведення з експлуатації окремих її ділянок, переведення їх на інший вид транспорту чи зміни їх цільового призначення; організація, оптимізація та надійність роботи компресорних станцій в реверсному режимі та за умов неповного завантаження (при зменшенні обсягів транспортування); забезпечення надійності роботи лінійних ділянок магістральних газопроводів в умовах неповного завантаження, шляхом

створення аналітичної моделі з відбракування менш надійних ділянок трубопроводів, на основі ймовірнісних моделей; дослідження процесів, пов'язаних з ремонтом магістральних газопроводів, для вивчення їх впливу на напружений стан, міцність та зносостійкість лінійної частини магістральних газопроводів, з метою забезпечення ефективної та безаварійної роботи газотранспортних систем в аверсно-реверсному режимі; розроблення надійних та ефективних режимів експлуатації тимчасово відключених або неповністю завантажених ділянок лінійної частини газопроводів при транспортуванні альтернативних видів продукту: транспортуванні та зберіганні вуглекислого газу, транспортуванні суміші природного газу з воднем, транспортуванні вантажних контейнерів в потоці повітря; розроблення технік та технологій модернізації тривалоексплуатованих трубопроводів під наведені альтернативні способи їх використання з метою забезпечення їх надійності та збережуваності.

У другому розділі проведено математичне моделювання режимів роботи складних газопроводів при неповному завантаженні; дослідження впливу оптимізації роботи компресорних станцій (КС) при неповному завантаженні на пропускну здатність газопроводу; дослідження нестационарних процесів в газопроводі при відборі та підкачуванні газу; дослідження нестационарних процесів в газопроводі при відключенні КС.

На основі характеристик компресорних станцій і лінійних ділянок складної газотранспортної системи побудовано математичну модель, яка дозволяє за умов квазістационарного режиму роботи системи визначити її пропускну здатність і параметри режиму експлуатації. Розв'язок системи характеристичних рівнянь отримано у вигляді

$$Q = \sqrt{\frac{\prod_{j=1}^n A_j P_{B_1}^2 - P_k^2}{\sum_{i=1}^n \prod_{j=1}^n A_{j+1} (\bar{B}_j + C_j)}} \quad (1)$$

де  $Q$  – пропускну здатність газопроводу;  $A$ ,  $B$  – апроксимаційні коефіцієнти в характеристиках КС, що залежать від типу і схеми з'єднання ГПА;  $C$  – коефіцієнт характеристики лінійної ділянки, що враховує коефіцієнт гідравлічного опору ( $\lambda$ ), довжину ( $L$ ), еквівалентний діаметр ( $d$ ) газопроводу та властивості природного газу;  $j$  – номер ділянки;  $P_{B_1}$ ,  $P_k$  – відповідно, тиск на вході в першу КС та в кінці газопроводу.

На вказану модель накладаються обмеження у вигляді граничних тисків

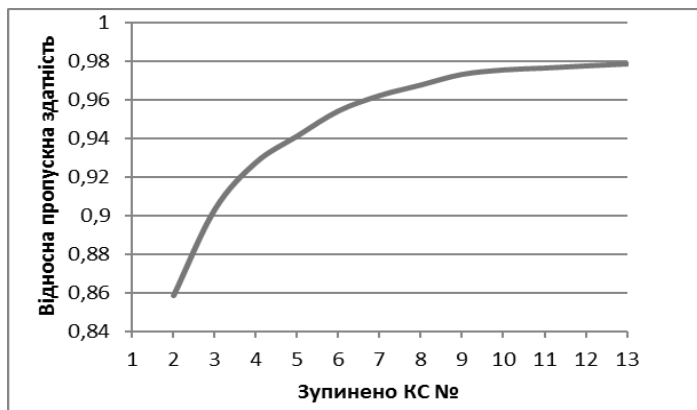
$$P_{H_j} \leq P_{\max} \quad P_{B_j} \geq P_{\min} \quad (2)$$

де  $P_{\max}$  – максимально можливий тиск з точки зору міцності трубопроводу;  $P_{\min}$  – мінімально допустимий тиск з точки зору нормальної роботи ГПА на КС.

В результаті реалізації моделі показано можливість виконувати регулювання продуктивності газотранспортної системи, шляхом виключення з режиму роботи окремих компресорних станцій. Встановлено ступінь впливу параметрів роботи КС

на режим експлуатації системи. Запропонована математична модель може бути використана для прогнозування роботи газотранспортної системи в комплексі з підземними сховищами газу.

Очевидно, що в умовах неповного завантаження ГТС, її продуктивність може бути суттєво нижчою за пропускну здатність. Тому виникає задача оптимального регулювання режимів роботи системи за критерієм мінімуму енерговитрат на транспортування газу. Одним з варіантів регулювання є виключення з роботи окремих компресорних станцій. Проведені розрахунки пропускну здатності та режиму роботи газопроводу “Союз”, за умови закриття міжниткових перемичок із іншими газопроводами, показали, що пропускну здатність газопроводу, за умови максимальної гідравлічної ефективності і при паспортних характеристиках газоперекачувальних агрегатів, на ділянці Новопсков–Хуст складає 92,219 млн.м<sup>3</sup>/добу, а при почерговому відключенні компресорних станцій, починаючи з КС-12 “Борова” і закінчуючи КС-22 “Хуст”, має інші значення, які характерні для певного номера відключеної станції. Результати розрахунків у вигляді графіка приведено на рисунку 1.



**Рисунок 1** – Вплив відключення КС на пропускну здатність системи

Отже, зі зменшенням номера компресорної станції в газотранспортній системі її відключення більшою мірою впливає на ступінь зменшення пропускну здатності.

Результати розрахунків регулювання продуктивності системи шляхом зміни швидкості обертання роторів нагнітачів на компресорних станціях системи КС-1 “Новопсков”, КС-2 “Борова” і КС-3 “Першотравнева” показують, що зміна відносної швидкості обертання ротора нагнітачів на КС “Новопсков” у межах (1,0-0,8) зумовлює зменшення пропускну здатності системи на 7,2 відсотка, аналогічна зміна відносної швидкості обертання ротора нагнітачів на КС “Борова” спричиняє зменшення пропускну здатності на 6,4 відсотка, а на КС “Першотравнева” – на 5,6 відсотка. Отже, ефективність регулювання режиму роботи газотранспортної системи шляхом зміни швидкості обертання роторів нагнітача тим вища, чим ближче до початку системи знаходиться компресорна станція.

Для встановлення характеру нестационарного процесу, викликаного збуреннями у вигляді стрибкоподібної зміни продуктивності, побудовано математичну модель на основі рівнянь руху газу та нерозривності, реалізація якої

дозволяє оцінити величину амплітуди коливання тисків в газопроводі по його довжині і в часі

$$P(x,t) = \frac{\lambda \rho w}{2dF^2} x(Q_0 - \frac{Q_0 - Q_L}{2L} x) + \frac{2}{L} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \int_0^L \sqrt{P_H^2 - (P_H^2 - P_K^2)x/L} \cos \frac{\pi n x}{L} dx - \frac{\lambda w}{\pi F} [Q_0(1 - (-1)^n)] - \frac{1}{2\pi n} (Q_0 - Q_L)(-1)^n \right\} \exp\left(-\frac{\lambda w}{4d} t\right) \sin\left[\frac{\lambda w}{4d} t \sqrt{\left(\frac{4\pi n c d}{\lambda w}\right)^2 - 1}\right] \cos \frac{\pi n x}{L}, \quad (3)$$

де  $P(x,t)$  – тиск як функція лінійної координати  $x$  та часу  $t$ ;  $w$  – лінійна швидкість газу;  $\rho$  – густина газу;  $F$  – площа поперечного перерізу трубопроводу.

Очевидно, що, з точки зору безпечної експлуатації газопроводу, найбільший інтерес представляють коливання тиску в початковому перерізі  $P(0,t)$ , де найбільші значення абсолютних тисків, що в суперпозиції з амплітудними коливаннями може призвести до перевищення допустимого навантаження.

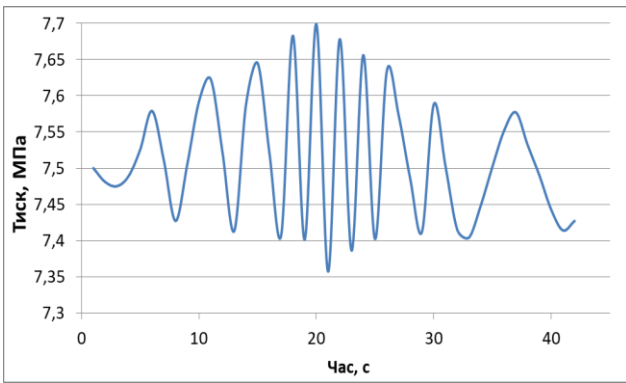
Результати реалізації математичної моделі засвідчують, що при зміні температури газу і основних його фізичних властивостей в діапазонах, що відповідають реальним режимам роботи газопроводів, їх вплив на величину амплітудних коливань тиску не суттєвий. Тому основними параметрами, що визначають величину амплітуди і частоти коливання тиску в нестационарному процесі, викликаному стрибкоподібною зміною витрати газу, слід вважати робочий тиск, величину витрати і лінійну координату відбору газу. Нестационарні процеси, за різних значень робочого тиску та лінійної координати відбору газу, змодельовано на рисунку 2.

Для прогнозування характеру коливання масової витрати в часі, на початку і в кінці газотранспортної системи великої протяжності, яка включає  $m$  проміжних компресорних станцій, викликаного відключенням чи повторним включенням  $k$ -тої компресорної станції, отримано залежності

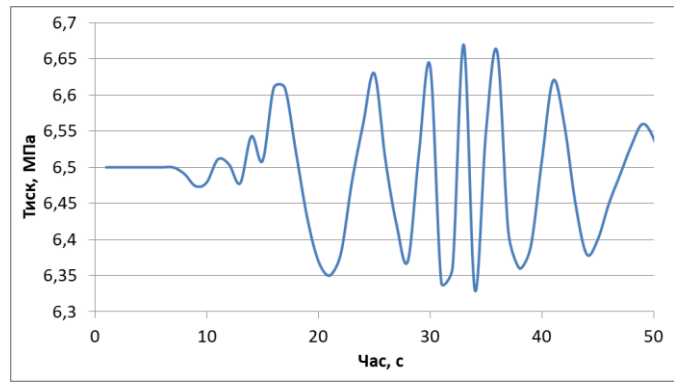
$$m(0,t) = -\frac{\pi d^3}{\lambda w} \left( \frac{P_H - P_K}{L} - \frac{\sum_{i=1, i \neq k}^m \Delta P_{KCi}}{L} + \frac{2L}{\pi^2} \Delta P_{Kck} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \cos\left(\frac{\pi n x_k}{L}\right) e^{-at} \left( \cos\left(\sqrt{\left(\frac{\pi n c}{L}\right)^2 - a^2} t\right) + \frac{a}{\sqrt{\left(\frac{\pi n c}{L}\right)^2 - a^2}} \sin\left(\sqrt{\left(\frac{\pi n c}{L}\right)^2 - a^2} t\right) \right) \right), \quad (4)$$

$$m(L,t) = -\frac{\pi d^3}{\lambda w} \left( \frac{P_H - P_K}{L} - \frac{\sum_{i=1, i \neq k}^m \Delta P_{KCi}}{L} + \frac{2L}{\pi^2} \Delta P_{Kck} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n^2} \cos\left(\frac{\pi n x_k}{L}\right) e^{-at} \left( \cos\left(\sqrt{\left(\frac{\pi n c}{L}\right)^2 - a^2} t\right) + \frac{a}{\sqrt{\left(\frac{\pi n c}{L}\right)^2 - a^2}} \sin\left(\sqrt{\left(\frac{\pi n c}{L}\right)^2 - a^2} t\right) \right) \right).$$

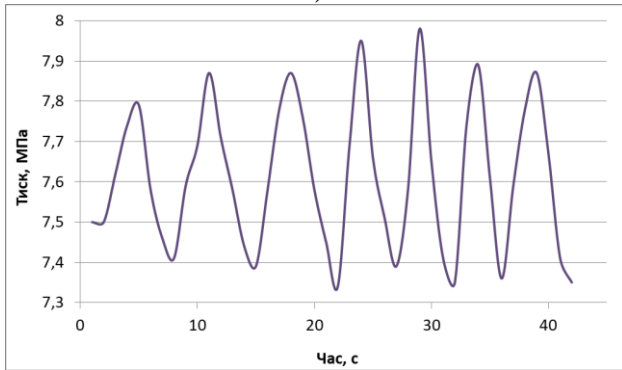
Розрахунки, проведені за рівняннями (4), при відключенні різник КС, дозволили отримати результати, які у вигляді графіків подано на рисунку 3.



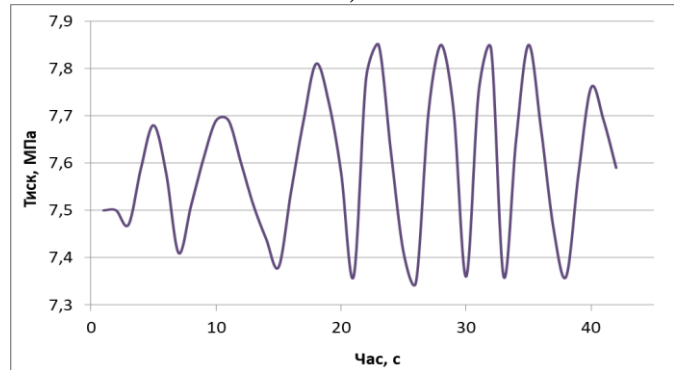
а)



б)



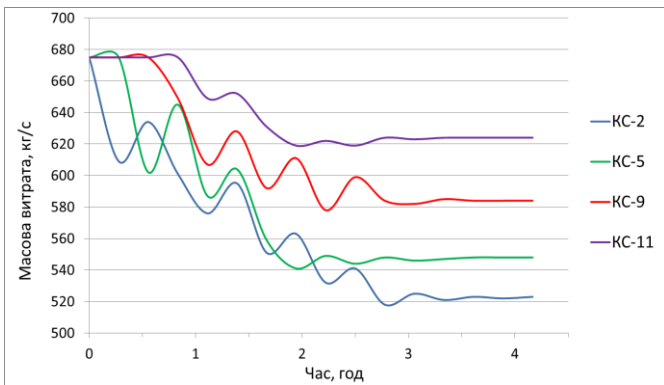
в)



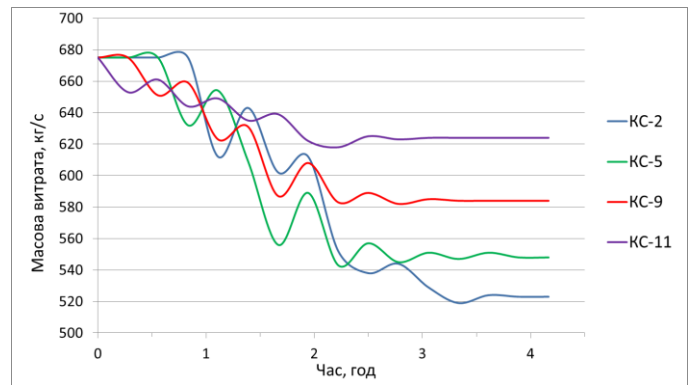
г)

а) – 7,5 МПа; б) – 6,5 МПа; в) – 7,5 МПа, за умов відбору на початку ділянки;  
г) – 7,5 МПа, за умов відбору посередині ділянки

**Рисунок 2** – Результати моделювання нестационарного процесу при включенні шляхового відбору при різному значенні початкового тиску



а)



б)

а) – на початку газопроводу; б) – в кінці газопроводу

**Рисунок 3** – Характер нестационарного процесу в газопроводі при відключенні різних компресорних станцій

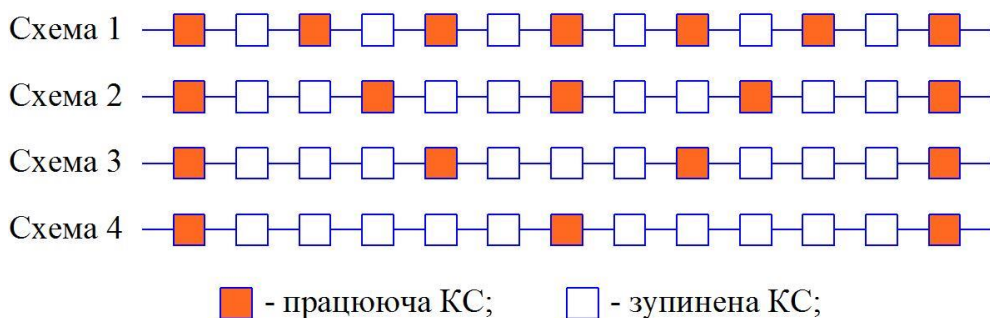
Як видно з графіків (рис. 3), тривалість нестационарного процесу, викликаного відключенням КС, зменшується на початку і в кінці газопроводу зі зростанням номера відключеної станції. Зауважимо, що нестационарні процеси в газопроводах є збитковими, з точки зору енерговитрат на трубопровідний транспорт, оскільки

викликають появу інерційних сил в потоці неперервного середовища, робота яких призводить до зниження загального ККД системи. Тому, найвигіднішим режимом слід вважати такий, для якого тривалість нестационарного процесу мінімальна.

У **третьому розділі** встановлено залежність оптимальної кількості працюючих КС від реальної продуктивності, визначені допустимі режими роботи КС з огляду на критичні значення тиску на вході та виході з них, запропоновано вибір конкретних КС для відключення з врахуванням показників їх надійності, а також, вирішено задачу оптимального керування транспортуванням газу з урахуванням надійності складових ГТС.

За умов неповного завантаження ГТС, для досягнення мети мінімізації енерговитрат на транспортування газу, першочергово слід вибрати оптимальні режими експлуатації газотранспортних систем при максимальних значеннях ККД перекачувальних агрегатів. Один зі шляхів зменшення енергозатрат на транспортування газу – це мінімізація витрати паливного газу за рахунок виключення з режиму роботи окремих ГПА на КС і зупинки компресорних станцій. В залежності від кількості зупинених КС і їх порядкового номера в системі пропускна здатність буде різною. Саме тому необхідно визначити оптимальну кількість працюючих КС для забезпечення замовленої продуктивності та оцінити реальний технічний стан кожного ГПА і спрогнозувати його залишковий ресурс та ймовірність безвідмовної роботи і, на основі відповідних прогнозів, визначити КС для відключення. Для визначення оптимальних параметрів роботи магістрального газопроводу при неповному завантаженні використовується метод конкуруючих порівнянь з урахуванням можливих схем розміщення працюючих КС на газопроводі (симетричних чи несиметричних).

Для газопроводу діаметром DN1400 з 13-ма компресорними станціями, обладнаними трьома газоперекачувальними агрегатами ГПА-Ц-16/76-1,44, було розраховано режими роботи за різних сценаріїв завантаження (від 100 до 50 відсотків). Також, було визначено, за різних симетричних схем відключення КС (рис. 4), необхідну кількість працюючих КС, кількість включених ГПА на них, ступінь підвищення тиску, відносні оберти роторів нагнітачів та затрачену потужність на транспортування газу, з урахуванням допустимих значень тисків на всмоктувальній та нагнітальній ділянках КС. При цьому використовувалась математична модель наведена в розділі 2. Отримані результати зведено в таблицю 1.

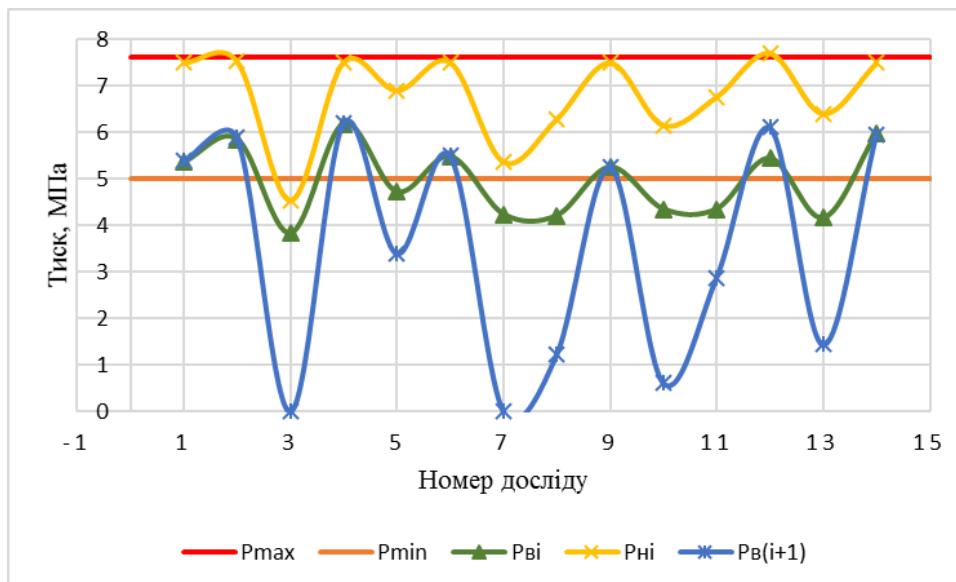


**Рисунок 4** – Симетричні схеми відключення КС

Проте, не всі схеми задовольняють умови надійності та ефективності роботи системи в цілому, оскільки при відключенні певної кількості КС, для певного значення коефіцієнта завантаженості  $K_{зав}$ , можливі падіння тиску, на всмоктувальній ділянці КС, до значень нижче допустимих  $P_{min}$ , необхідних для безпомпажної роботи ГПА. А також, відповідно до розрахунку, можливі перевантаження газопроводу на нагнітальній ділянці при збільшенні тиску більше допустимого максимального значення  $P_{max}$ , з точки зору міцності трубопроводу. Тому, режими, які виходять за рамки допустимих тисків на вході та виході КС, слід відкинути відповідно до рисунку 5.

**Таблиця 1** – Результати розрахунку режимів роботи газопроводу за різних сценаріїв завантаження

№	$Q$ , млрд.м <sup>3</sup> на рік	$K_{зав}$	$L_{КС}$ , км	$N_{КС}$ , шт (розрахункова)	$N_{КС}$ , шт (за симетричною схемою)	$P_{П}$ , МПа	$P_{Ві}$ , МПа	$P_{Ні}$ , МПа	$P_{В(i+1)}$ , МПа	$N_{ГПА}$ , шт	$\epsilon$	$\eta_{пол}$	$n/n_n$	$N_{гПА}$ , кВт	$N_{кС}$ , кВт	$N_e$ , кВт
1	33	1	88,5	13	13	7,5	5,36	7,501	5,38	3	1,4	0,83	0,96	14180	42540	553020
2	29,7	0,9	88,5	10	13	7,5	5,85	7,53	5,88	3	1,3	0,74	0,80	7725	23175	301275
3	29,7	0,9	177	10	7	7,5	3,83	4,53	0	3	1,25	0,72	0,98	9373	28119	196833
4	26,4	0,8	88,5	8	13	7,5	6,18	7,508	6,197	2	1,22	0,76	0,69	6162	12324	160212
5	26,4	0,8	177	8	7	7,5	4,72	6,9	3,4	3	1,48	0,81	0,98	13090	39270	274890
6	23,1	0,7	177	6	7	7,5	5,48	7,509	5,49	2	1,38	0,83	0,90	11890	23780	166460
7	23,1	0,7	265,5	6	5	7,5	4,24	5,36	0	2	1,28	0,73	0,96	10850	21700	108500
8	23,1	0,7	265,5	6	5	7,5	4,21	6,28	1,23	3	1,5	0,82	1,02	12240	36720	183600
9	19,8	0,6	265,5	5	5	7,5	5,25	7,496	5,253	2	1,43	0,79	0,92	12140	24280	121400
10	19,8	0,6	354	5	4	7,5	4,35	6,15	0,617	2	1,42	0,83	1,00	13480	26960	107840
11	19,8	0,6	354	5	4	7,5	4,35	6,76	2,88	3	1,56	0,76	1,02	13120	39360	157440
12	16,5	0,5	354	3	4	7,5	5,44	7,702		2	1,41	0,71	0,88	9885	19770	79080
13	16,5	0,5	531	3	3	7,5	4,16	6,4	1,44	2	1,51	0,82	1,00	13190	26380	79140
14	16,5	0,5	265,5	3	5	7,5	5,97	7,487	5,956	1	1,25	0,83	0,76	8079	8079	40395

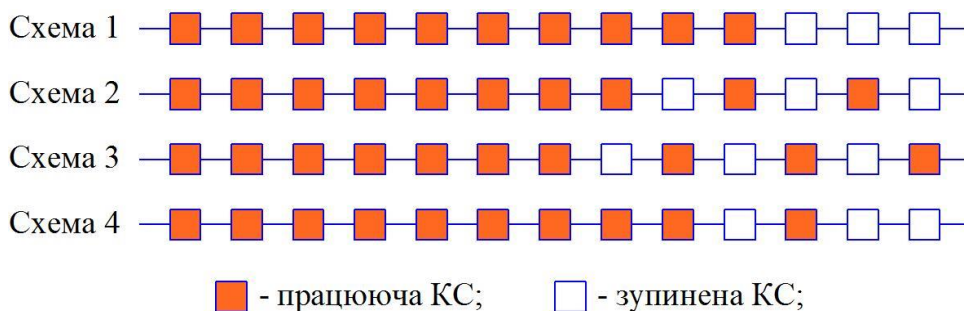


**Рисунок 5** – Порівняння значень тисків на вході  $P_{vi}$  та виході  $P_{ni}$   $i$ -тої КС, тиску на вході  $(i+1)$  КС з допустимими  $P_{max}$  та  $P_{min}$

Таким чином з ряду проведених теоретичних досліджень, наведених в таблиці 1, можуть бути реалізовані, при різному об'ємі завантаження, тільки режими з



номером: №1, №2, №4, №6, №9, №12, №14. Отже, як видно з таблиці 1, для перекачування газу, з продуктивністю 90 відсотків від максимальної, достатньо використовувати 10 працюючих КС, проте, симетричне їх розташування є неможливим. Розглянемо приклад розташування 10-ти працюючих КС за несиметричною схемою. Було встановлено, що максимальної ефективності та продуктивності роботи газопроводу можна досягнути, коли працюючі КС будуть розміщені на початку газопроводу (рис. 6, схема 1). Проте таке розташування при витраті 90 відсотків від максимальної, призведе до зупинки останніх двох ділянок газопроводу через значну депресію тиску. Для схем 2 та 3, на рисунку 3.8, теж спостерігатиметься зупинка останніх ділянок через надмірне зниження тиску, а використання схеми 4 призведе до зменшення акумулюючої здатності газопроводу. Тому, застосування таких схем відключення КС при недовантаженні системи є недопустимим. Проте, при зниженні завантаженості газопроводу до (80-70) відсотків від максимального, вони можуть бути використані, і вибір конкретної з них буде проводитися за критерієм енергоефективності. Тут також слід відмітити, що різниця енергозатрат при застосуванні тієї чи іншої схеми буде незначна, тому при виборі КС для відключення слід зважати ще й на критерії надійності її роботи та окремих ГПА.



**Рисунок 6** – Несиметричні схеми відключення КС на газопроводі DN1400 при зменшенні його завантаженості на 90 відсотків

Для підвищення надійності компресорних станцій впроваджено систему резервування ГПА і проведення профілактичного їх обслуговування. На даний час актуальним питанням обслуговування ГПА на компресорних станціях є оцінка технічного стану кожного одиничного агрегату, з метою прогнозування його терміну безвідмовної експлуатації, тренду ККД, залишкового ресурсу, періодичності профілактичних ремонтів або необхідності повної заміни.

При прогнозуванні витримують наступну логічну послідовність: складають цільову функцію оптимальних прогнозованих показників; встановлюють характеристики функції зміни параметрів стану елементів машин; визначають ймовірності відмови, попереджувальних операцій, числа перевірок і середнього ресурсу елементів машин, в залежності від характеристик функції зміни їх параметрів стану, керуючих показників; підраховують ймовірні питомі витрати, пов'язані з усуненням наслідків відмови, проведенням попереджувальних операцій і діагностуванням елементів; проводять розрахунки, визначають оптимальні величини

прогнозованих показників, складають номограми і таблиці. На підставі отриманих результатів синтезують прогнози. Визначення ймовірностей відмови, попереджувальних, відновлювальних операцій і середнього ресурсу елементів в залежності від характеристик функції зміни їх параметрів керуючих показників – основний етап прогнозування. Ймовірності відмови і попереджувального відновлення елемента – дві конкуруючі функції, одержувані на основі аналізу та екстраполяції зміни параметра елемента до граничної величини. З їх допомогою відбувається синтез прогнозування з оптимізацією різних показників машин.

Для знаходження ймовірних витрат на одиницю продукції, обумовлених критерієм оптимізації, на основі техніко-економічного аналізу, визначають витрати, пов'язані з усуненням наслідків однієї відмови і проведенням попереджувального відновлення, перевірки елемента. Одержані величини множать на відповідні значення ймовірностей відмови, попереджувального відновлення і число перевірок та ділять на середній ресурс елемента. При синтезі прогнозів велику увагу приділяють виявленню та врахуванню зв'язків між змінами параметрів стану елементів, зв'язки встановлюють техніко-економічним аналізом.

Прогнозування за середньостатистичною зміною параметра зазвичай застосовують при відсутності інформації про напрацювання конкретного елемента в минулому; при встановленні допустимих відхилень параметра елементів, який відновлюють в процесі технічного обслуговування або поточного ремонту; при неможливості використовувати метод прогнозування за реалізацією через організаційні труднощі. Цільова функція допустимого відхилення параметра стану елемента найбільш важливого показника, що є основою всіх технічних потреб на ремонт і технічне обслуговування машин, має вигляд

$$G = \min_{0 \leq D \leq u_r} \left[ \frac{AQ(D)}{T_{cp}(D)} + \frac{C(1-Q(D))}{T_{cp}(D)} \right], \quad (5)$$

де  $Q(D)$  – ймовірність відмови елемента за термін його служби в залежності від допустимого відхилення параметра  $D$ ;  $T_{cp}(D)$  – фактично використовуваний ресурс елемента по параметру в залежності від  $D$ , одиниць напрацювання;  $A$  і  $C$  – середні дискретні витрати, пов'язані з усуненням наслідків відмови і попереджувальним відновленням елемента по параметру.

Цільова функція як допустимого відхилення параметра, так і періодичності діагностування має вигляд

$$G = \min_{\substack{0 \leq D \leq u_r \\ t_M > 0}} \left[ \frac{AQ(D, t_M)}{T_{cp}(D, t_M)} + \frac{C(1-Q(D, t_M))}{T_{cp}(D, t_M)} + \frac{BK_n(D, t_M)}{T_{cp}(D, t_M)} \right], \quad (6)$$

де  $B$  і  $K_n(D, t_M)$  – витрати, пов'язані з діагностуванням;  $n$  – кількість перевірок елемента в залежності від допустимого відхилення параметра і періодичності діагностування, без врахування перевірок при попереджувальному відновленні і усуненні наслідків відмови.

Цільова функція (6) враховує те, що в момент досягнення параметром стану складової частини граничного значення, що характеризує відмову, агрегат зупиняють і складову частину замінюють (відновлюють).

Запропоновані методи, що базуються на використанні стохастичних математичних моделей, з використанням в якості вихідної інформації передісторії експлуатації газоперекачувальних агрегатів на компресорних станціях, дозволяють оцінити реальний технічний стан кожного ГПА і прогнозувати його залишковий ресурс та ймовірність безвідмовної роботи.

Як відомо, втрати від недопоставок газу споживачам значно перевищують втрати, пов'язані з технологічними затратами на транспорт газу. Тому, розглядається задача вибору оптимального співвідношення між вартістю і надійністю перекачування газу. Зазначена задача досліджується за допомогою змішаної моделі, заснованої на використанні методів динамічного програмування і математичних методів теорії надійності. На основі реалізації створеної математичної моделі розв'язана задача вибору оптимального співвідношення між енергозатратами та рівнем надійності магістральних газопроводів, в результаті чого забезпечується раціональний режим експлуатації і мінімізуються експлуатаційні витрати на транспортування газу з урахуванням аварійних втрат.

У **четвертому розділі** для оцінювання реального стану окремих ділянок лінійної частини газопроводу, при виведенні їх з експлуатації, розроблена математична модель, наведені результати експериментальних досліджень ерозійних процесів в порожнині фасонних елементів газопроводів та впливу ґрунту, як корозійного середовища, на механічні властивості сталі X70. Також, тут наводиться розроблена методика підвищення надійності роботи газопроводів, шляхом відновлення їх проектного положення, та математична модель розрахунку напружено-деформованого стану трубопроводу при цьому.

При виведенні окремих ділянок чи цілого газопроводу з експлуатації, в процесі оптимізації його роботи в умовах неповного завантаження, слід враховувати не тільки показники конструктивної надійності, але і їх прогнозовані параметри, на основі ретроспективного аналізу та результатів діагностування реального стану стінки труби та ізоляції, а також результати прогнозування впливу навколишнього середовища. Тому, пропонується схема, згідно якої потрібно проводити відбракування або виведення з експлуатації ділянок лінійної частини газопроводів (рис. 7).

Для можливості комплексного порівняння кількох лінійних ділянок газопроводу пропонується введення коефіцієнта, який назвемо дефектним балом і позначимо  $DB$ , величина якого визначається за формулою

$$DB = \frac{P(t) \prod_{j=1}^m P_j(U_j > 0)}{5L_{3AG}} \left( \left( L_{3AG} - \sum_{i=1}^{n_1} k_{kp,i} L_{kp,i} \right) + \left( L_{3AG} - \sum_{i=1}^{n_2} k_{ep,i} L_{ep,i} \right) + \left( L_{3AG} - \sum_{i=1}^{n_3} k_{iz,i} L_{iz,i} \right) + \right. \\ \left. + \left( L_{3AG} - \sum_{i=1}^{n_4} k_{zp,i} L_{zp,i} \right) + \left( L_{3AG} - \sum_{i=1}^{n_5} k_{h,i} L_{h,i} \right) \right), \quad (7)$$

де  $P(t)$  – ймовірність безвідмовної роботи газопроводу на основі ретроспективного аналізу;  $P_j(U_j > 0)$  – ймовірність безвідмовної роботи газопроводу під дією впливів та навантажень на нього;  $U_j = R_j - S_j$  – різниця несучої здатності газопроводу та граничного його стану за міцністю, стійкістю, деформативністю та тріщиностійкістю ( $j=1 \dots 4$ ;  $m=4$ );  $L_{заг}$  – загальна довжина ділянки, що оцінюється;  $k_{кр.i}$ ,  $k_{ер.i}$ ,  $k_{із.i}$ ,  $k_{ер.і}$ ,  $k_{h.i}$  – відповідно, вагомні коефіцієнти корозійних та інших видів дефектів, ерозійних дефектів, дефектів ізоляції, впливу ґрунтових середовищ, глибини закладання газопроводу в ґрунті;  $L_{кр.і}$ ,  $L_{ер.і}$ ,  $L_{із.і}$ ,  $L_{ер.і}$ ,  $L_{h.і}$  – відповідно, довжина ділянки газопроводу з певного типу корозійними дефектами, ерозійними дефектами, дефектами ізоляції, ґрунтовими середовищами, а також з певною глибиною закладання газопроводу в ґрунті, що не відповідає проекту.



**Рисунок 7** – Схема відбракування окремих ділянок лінійної частини магістральних газопроводів

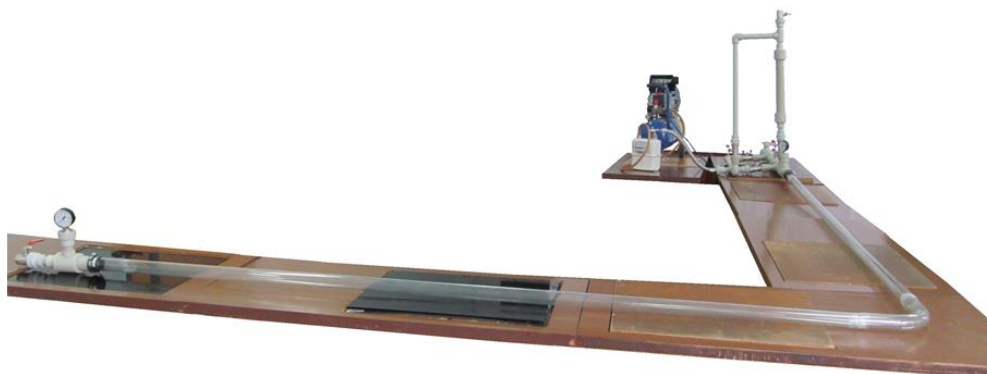
Значення дефектного балу буде коливатися в межах  $DB=[0 \dots 1]$  і чим ближчим воно буде до одиниці, тим вважатиметься кращим технічний стан газопроводу та сприятливішим вплив навколишнього середовища на нього для подальшої його експлуатації за основним призначенням.

Як видно з рівняння (7) значний вплив на технічний стан газопроводу мають такі процеси як ерозія та корозія, а також невідповідність його глибини закладання вимогам нормативних документів.

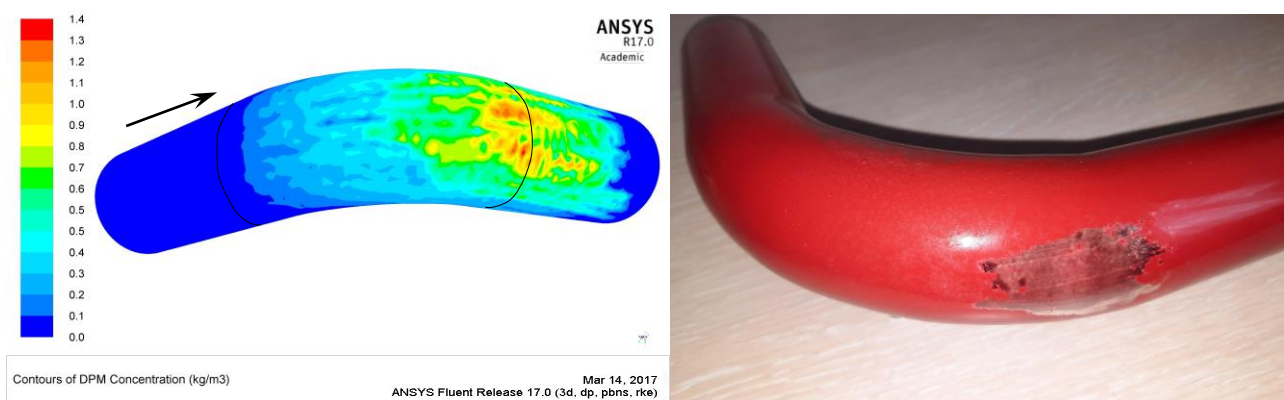
З метою підвищення якості обстеження фасонних елементів трубопроводів на наявність ерозійного зношування, важливо знати місця інтенсивного ударяння рідких і твердих частинок, які переносяться потоком природного газу, до стінки трубопроводу, швидкість, діаметри частинок, кути атаки в місці ударяння. Тому, було розроблено експериментальний стенд для дослідження руху двофазних потоків фасонними елементами трубопроводів та виявлення місць інтенсивного ерозійного зношування фасонних елементів трубопроводів (рис. 8).

Для виявлення місць ерозійного зношування фасонних елементів трубопроводів внутрішня поверхня відводу фарбувалась фарбою і, після пропускання ним повітря з вмістом сухого кварцового піску, визначалися місця

виносу нанесеної фарби. Експериментально виявлені місця ерозійного зношування фасонних елементів трубопроводів співпали з місцями їх ерозійного зношування, виявленими комп'ютерним моделюванням, що підтверджує достовірність моделювання (рис. 9).



**Рисунок 8** – Експериментальний стенд для досліджень руху двофазних потоків відводом



- а) – поля швидкості ерозійного зношування на контурах відводу;  
 б) – відвід з видаленою двофазним потоком фарбою з внутрішньої його поверхні

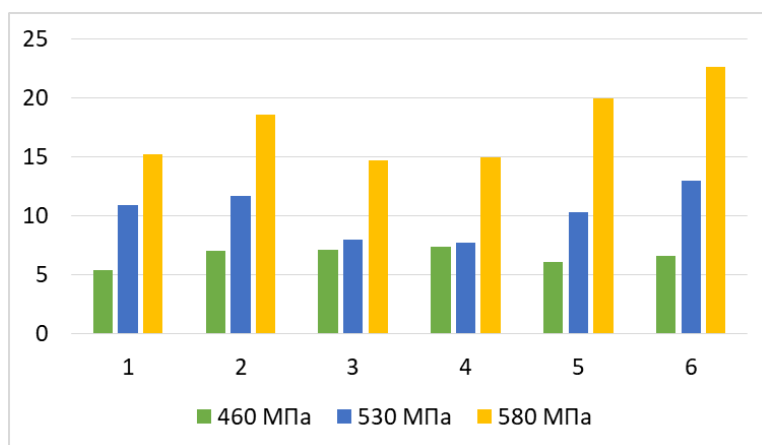
**Рисунок 9** – Результати досліджень відводу на ерозійне зношування

Оцінювання деформаційної поведінки матеріалу трубопроводу за умов навантажень і фізико-хімічного впливу середовища, максимально наближених до експлуатаційних, забезпечує можливість прогнозування залишкового ресурсу діючих і нових трубопроводів. Тому, було досліджено вплив тривалого навантаження на деформаційну поведінку трубної сталі X70 у стані постачання у хлоридних і хлоридно-сульфатних середовищах (табл. 2) та порівняно з аналогічними дослідженнями для сталей 17ГС та 19Г.

**Таблиця 2** – Хімічний склад модельних середовищ

№ МС		1	2	3	4	5	6
Концентрація, mol/l	NaCl	0,01	0,05	0,1	0,005	0,025	0,05
	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	-	-	-	0,005	0,025	0,05

При порівнянні результатів ранжування ґрунтових електролітів для сталі Х70 (рис. 10) та для сталей 17ГС та 19Г спостерігаються певні закономірності, відповідно до яких, можна класифікувати ґрунти за рівнем впливу і при відбракуванні трубопроводів посилаються на дану класифікацію.



**Рисунок 10** – Ранжування ґрунтових електролітів за небезпекою розвитку корозійно-механічних процесів для сталі Х70

Узагальнення показників дає змогу виділити найнебезпечніші серед нейтральних ґрунтових електролітів середовища. Для досліджуваних марок сталей це будуть МС2, МС5 та МС6.

Останній в дужках доданок, в рівнянні (7) з визначення дефектного балу, враховує наявність ділянок газопроводів з невідповідністю глибини закладання проектній чи нормативній. Проте, вплив даного доданка можна і треба мінімізувати виконанням ремонтних робіт з підсаджування трубопроводів. При цьому, в залежності від реальної глибини закладання трубопроводу можуть бути використані дві схеми виконання робіт: без підтримування труби та з підтримкою (рис. 11).

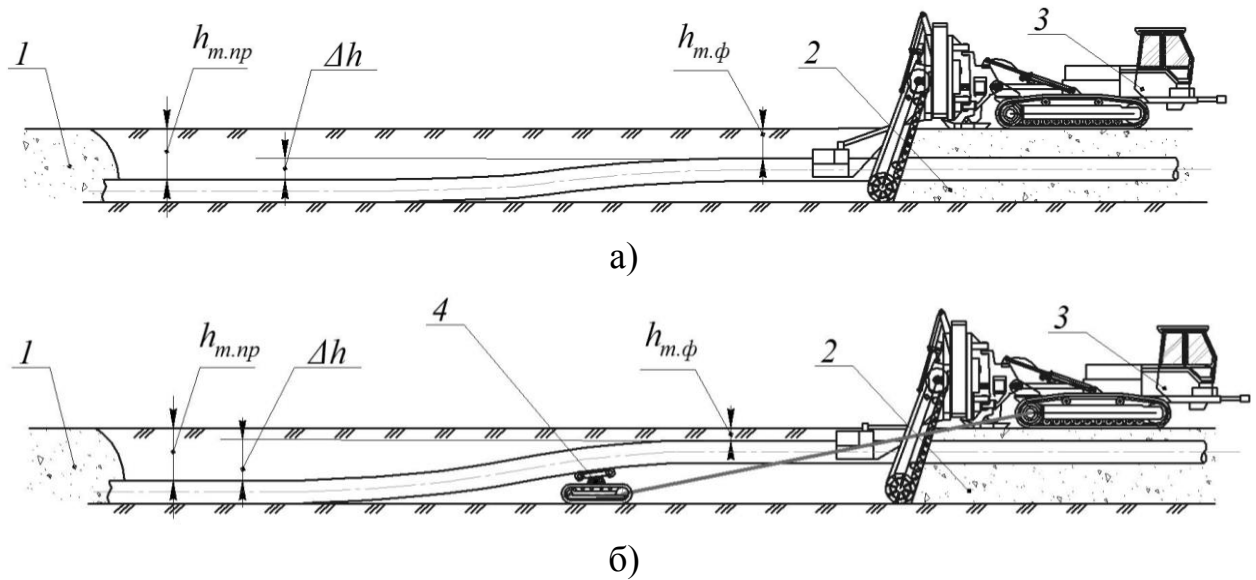
Розрахунок напружено-деформованого стану ділянки трубопроводу, що підсаджується, полягає у визначенні відстані розкритої ділянки  $l$ , на якій трубопровід під дією власної ваги почне опускатися на проектну відмітку та відстані до точки підтримування трубоукладачем  $a_p$ , для схеми з підтримуванням трубопроводу (рис. 12), відповідно, за отриманими формулами

$$l = \sqrt[4]{\frac{72EI\Delta h}{q_{mp}}}, \quad (8)$$

$$72EI\Delta h = \frac{q_{mp}a_p^2b(2a_p - b)(a_p + b)^2}{(1-k)(a_p + b)^2 - a_p^2}. \quad (9)$$

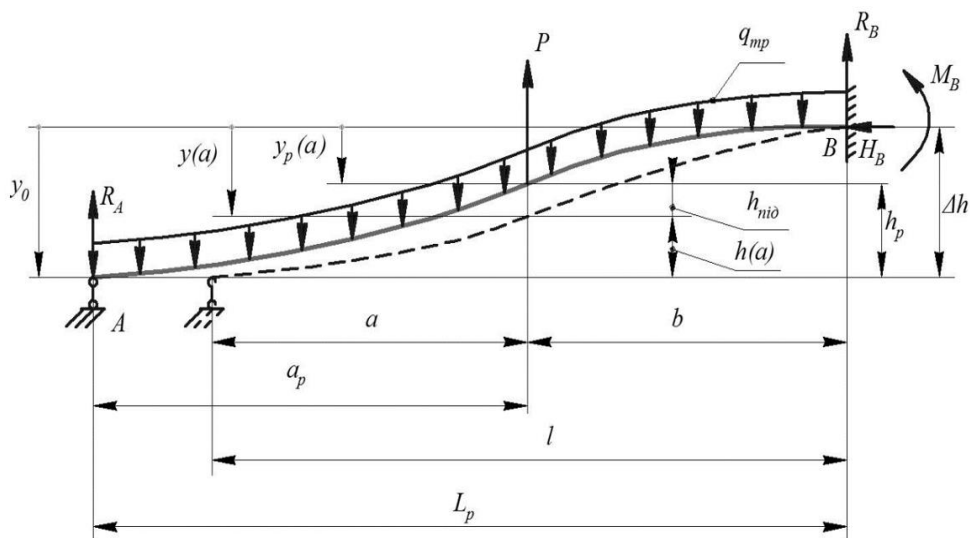
та у встановленні максимального значення згинального моменту і перевірці умови

$$\frac{M_{\max}}{W} \leq \psi_4 R_2 - |\sigma_{nod(t,P)}|. \quad (10)$$



1 – зона, в якій трубопровід перебуває в проектному положенні; 2 – зона, в якій проводиться розробка ґрунту та підкопування під трубопроводом; 3 – машина для розробки траншеї та підкопування під трубою; 4 – підтримуючий механізм;  $h_{m.np}$  – проектна (нормативна) глибина залягання трубопроводу;  $h_{m.\phi}$  – фактична глибина залягання;  $\Delta h$  – різниця проектної та фактичної глибини залягання трубопроводу

**Рисунок 11** – Схеми виконання робіт з підсаджування трубопроводу під власною вагою (а) та з підтримуванням (б)



----- – лінія вигину трубопроводу без підйому; ————— – лінія вигину трубопроводу з підйомом його підтримуючим механізмом;  $P$  – зусилля на підтримуючий механізм

**Рисунок 12** – Розрахункова схема трубопроводу при заглибленні його із використанням підтримуючого механізму

Таким чином, розроблено спосіб підвищення експлуатаційної надійності та забезпечення робоздатності газопроводів з невідповідним нормативному рівнем заглиблення.

**П'ятий розділ** присвячено вивченню впливу зварювальних робіт на діючих газопроводах на їх надійність, а саме: вивчено можливості наводнювання та науглецювання металу трубопроводу при термічному розкладанні метану під час зварювання, а також експериментально досліджено ударну в'язкість основного металу та зварного шва трубної сталі класу X70 при різних значеннях температури випробовування.

Відомо, що в процесі виконання зварювальних робіт на діючих газопроводах в околі шва формується розігріта ділянка металу з пониженими міцнісними характеристиками. Розміри і температура (яка з внутрішньої сторони стінки труби може досягати значень до 1000 °С) розігрітої зони визначаються насамперед зварювальними режимами і розмірами заплавленої ділянки, залежать від діаметра і товщини труби, а також швидкості потоку газу. Відомо, що термічне розкладання метану ( $\text{CH}_4 \rightarrow \text{C}_{(\text{ТВ})} + 2\text{H}_2$ ) починається при (380-400) °С і парціальний тиск молекулярного водню може досягати (1-1,5) МПа. При такому тиску водню слід очікувати значного наводнювання металу в зоні термічного впливу, сформованої зі сторони внутрішньої поверхні труби. Тому, наступним етапом роботи було розроблено математичну модель дифузійних процесів, для аналізу кінетики насичення металу воднем і вуглецем, в результаті термічного розкладання метану.

В загальному випадку, для аналізу перерозподілу водню в металі, доцільно розв'язати нестационарну задачу дифузії водню, розділивши поглинутий металом водень на дифузійно-рухливий і нерухомий. Диференціальне рівняння дифузії має вигляд

$$\frac{\partial C(x,t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C(x,t)}{\partial x^2} - K \cdot [C(x,t) - C_p], \quad t > 0, \quad 0 \leq x \leq \delta, \quad (11)$$

де  $C(x,t)$  – концентрація водню в металі;  $D$  – коефіцієнт зернограничної дифузії водню в сталі;  $C_p$  – початкова рівноважна концентрація водню в металі.

Другий член у правій частині рівняння (11) визначає потужність від'ємного джерела водню, пропорційного змінам концентрації водню. Це джерело, з характерним кінетичним коефіцієнтом  $K$ , враховує поглинання дифузійного водню різними “уловлювачами” (пастками) в металі і вилучення його з дифузійного процесу.

Для випадку повної десорбції дифузійного водню з металу фактичний, експериментально вимірюваний розподіл водню у стінці складе

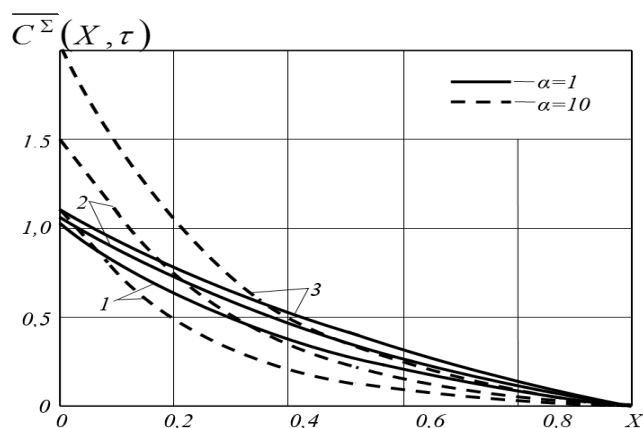
$$\overline{C^\Sigma}(X, \tau) = \frac{C^\Sigma(X, \tau) - C_p}{C_n - C_p} \times \left[ \frac{\text{sh}[\sqrt{\alpha}(1-X)]}{\text{sh}(\sqrt{\alpha})} \cdot (1 + \alpha\tau) + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \cdot \frac{2\mu_n \cdot \sin[\mu_n(1-X)] \cdot \{\alpha + \mu_n^2 \exp[-(\mu_n^2 + \alpha)\tau]\}}{(\mu_n^2 + \alpha)^2} \right], \quad (12)$$



де  $C_n$  – поверхнева концентрація водню;  $h$  – коефіцієнт фазового переходу;  $\tau = \frac{Dt}{\delta^2}$ ;

$$\alpha = \frac{K\delta^2}{D}; \beta = h\delta; X = \frac{x}{\delta}.$$

За результатами розрахунків, на рисунку 13, побудовано графіки розподілу сумарної концентрації водню (дифузійний і поглинутий пастками) по товщині стінки для різних часів.



1 –  $\tau=0,01$ ; 2 –  $\tau=0,05$ ; 3 –  $\tau=0,1$

**Рисунок 13** – Розподіл водню по товщині пластини при різному часі

При граничних умовах, коли увесь поглинутий водень залишається в металі стінки, експериментально вимірюваний розподіл водню у стінці визначиться з рівняння

$$\overline{C^\Sigma}(X, \tau) = \frac{C^\Sigma(X, \tau) - C_p}{C_n - C_p} \times \left[ \frac{\operatorname{ch}[\sqrt{\alpha}(1-X)]}{\operatorname{ch}(\sqrt{\alpha})} \cdot (1 + \alpha\tau) - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\mu_n \cdot \cos[\mu_n(1-X)] \cdot \{\alpha + \mu_n^2 \exp[-(\mu_n^2 + \alpha)\tau]\}}{\sin \mu_n \cdot (\mu_n^2 + \alpha)^2} \right]. \quad (13)$$

Аналізуючи кінетику водневого насичення в умовах як повної блокади десорбції водню з металу, так і при повній його десорбції з металу, можна стверджувати, що при малих значеннях безрозмірного часу  $\tau$ , інтенсивність насичення практично однакова.

Навуглецювання металу, при температурах внутрішньої поверхні не вище 983 °С в умовах короткочасного термічного циклу, якщо і матиме місце, то воно буде незначним. Інша ситуація складається, якщо температура металу на внутрішній поверхні досягне 1147 °С і вище. За наявності вуглецю на внутрішній поверхні (при рівні концентрації близько 4,3 відсотки) формується тонка плівка евтектичного складу чавуну на локальній ділянці внутрішньої поверхні, безпосередньо під зварювальною дугою.

Дифузійне перенесення вуглецю в рідкій і твердій фазах описується рівняннями

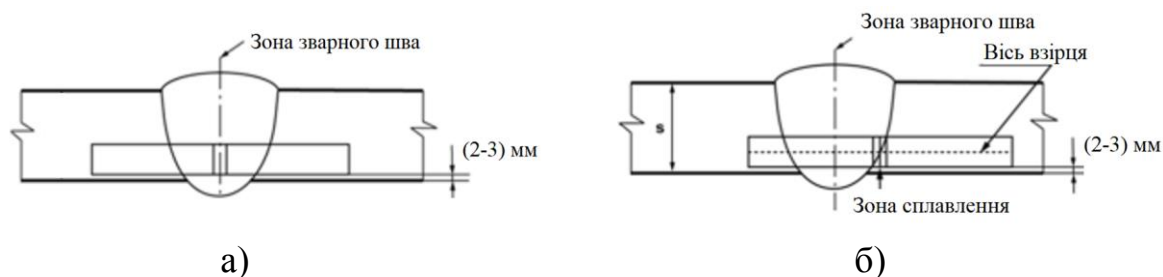
$$C_L(x,t) = C_{L0} + (C_{Ly} - C_{L0}) \cdot \frac{\operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{D_L t}}\right)}{\operatorname{erf}(\beta)};$$

$$C_S(x,t) = C_0 + (C_{yL} - C_0) \cdot \frac{\operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{D_S t}}\right)}{\operatorname{erfc}\left(\beta \sqrt{\frac{D_L}{D_S}}\right)}.$$
(14)

де  $D_L$  і  $D_S$  – відповідно коефіцієнти дифузії вуглецю в рідкій і твердій фазах.

В загальному, необхідно відмітити, що і локальне наводнювання металу, і науглецювання сприяють окрихченню сталі. Отже, окрім того, що зварні шви є макроконцентраторами напружень зі складною фізико-механічною структурно-неоднорідною системою, яка може містити технологічні концентратори напружень (підрізи, непровари, пори тощо), виконання зварних швів може бути причиною водневого розтріскування. Тому, в розділі 5 досліджено вплив температури випробувань на ударну в'язкість основного металу та зварного шва трубної сталі класу X70.

Зразки для випробувань вирізали з труби діаметром 1420 мм, товщиною стінки 15,7 мм. Зварні шви виконували спеціальними електродами: УОНІ 55У, діаметром 3,5 мм, яким заварювали корінь шва, та УОНІ 52У, діаметром 4,0 мм – для заповнення шва. Зразки вирізали паралельно поздовжній осі труби. Ударну в'язкість визначали на зразках Шарпі розмірами 10×10×55 мм з V-подібним надрізом глибиною 2 мм і радіусом заокруглення в вершині (0,25±0,025) мм. Оцінювали ударну в'язкість металу за кімнатних та понижених температур на зразках з надрізом, який наносили у різних зонах зварного з'єднання (рис. 14).



а) – зразок з надрізом по центру ЗШ; б) – зразок з надрізом по лінії сплавлення та зоні термічного впливу

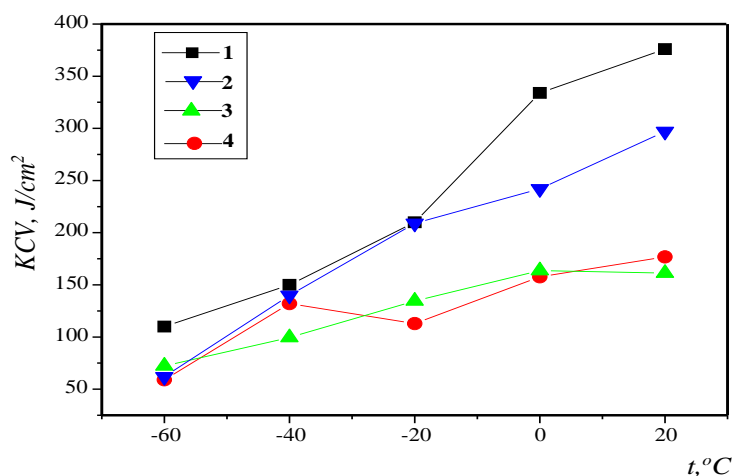
**Рисунок 14** – Схема вирізання зразків Шарпі зі зварного з'єднання

Використано зразки з основного металу (ОМ) та темплетів вирізаних механічним способом (фрезою) (ЗШ1) та плазмовим способом (ЗШ2). Понижені температури використовували для зниження релаксаційної здатності матеріалу. Випробування проводили на копрі RKP-300 «AMSLER».

Трубна сталь класу міцності X70 мала високу ударну в'язкість, що свідчить про її відповідність вимогам. Зокрема для ОМ - KCV для температур випробувань

20 °С; 0 °С; -20 °С; -40 °С; -60 °С становить відповідно: 376 Дж/см<sup>2</sup>; 334 Дж/см<sup>2</sup>; 210 Дж/см<sup>2</sup>; 150 Дж/см<sup>2</sup>; 110 Дж/см<sup>2</sup>. Як видно з рисунку 15, рівень ударної в'язкості металу швів досліджених труб загалом також є достатньо високим.

Для зразків вирізаних з зварного шва (Ш) рівень ударної в'язкості для температур -40 °С та -20 °С є ідентичним основному матеріалу. За кімнатної температури ударна в'язкість основного металу труби є в 1,3 рази вищою ніж зварного шва. Ударна в'язкість ділянок сплавлення ЗШ1 та ЗШ2 для температури -40 °С є відповідно в 1,14 та 1,5 рази нижчою ніж основного металу. Ця відмінність зростає із підвищенням температури випробувань та сягає максимуму при 20 °С, її значення становлять 1,9 (ЗШ1) та 1,5 (ЗШ2) відповідно.



1 – основний метал (ОМ); 2 – Шов (Ш);

3 – зона сплавлення (ЗШ1); 4 – зона сплавлення (ЗШ2)

**Рисунок 15** – Вплив температури на ударну в'язкість трубної сталі X70

Виявлено, що зразки вирізані з зони зварного шва руйнуються за ударної в'язкості близької до в'язкості основного матеріалу, а більш небезпечними є зразки вирізані із зони сплавлення, що пов'язано з низькою пластичністю металу шва та пришовної зони.

В шостому розділі розглядаються альтернативні способи використання незадіяних або неповністю завантажених елементів ГТС з метою забезпечення їх корисного функціонування та збереження, а саме використання: в системах уловлювання та зберігання вуглецю, для транспортування суміші природнього газу з воднем чи для перевезення ними контейнерів (контейнерний пневмотранспорт). Розглянуто та частково вирішено пов'язані з цим задачі, а також запропоновані технології модернізації лінійних ділянок газопроводів під конкретні види транспортованого продукту.

Технологія уловлювання та зберігання вуглецю дозволяє зменшити викиди парникових газів, шляхом запобігання виходу в атмосферу двоокису вуглецю ( $CO_2$ ), який утворюється на точкових джерелах (на промислових підприємствах) у великій кількості, до виходу в атмосферу, а потім транспортування та закачування  $CO_2$  до підземних сховищ, для зберігання.

Прогноз використання таких технологій в енергетичних секторах Європи є досить перспективним. Проте, вологий вуглекислий газ та певна доля шкідливих домішок в ньому може призводити до протікання внутрішньотрубної корозії. А перехід, у вузькому діапазоні тисків, між різними агрегатними станами створює певні проблеми при його транспортуванні.

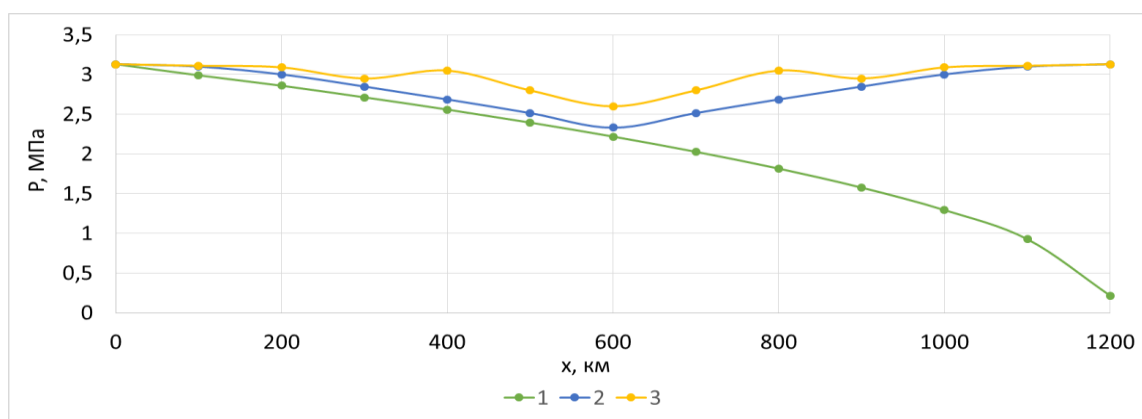
Перспективи розвитку водневих технологій в Європі та Україні також є значними. А стратегія розвитку трубопровідної мережі транспорту водню в Європі є високо амбітною. Але, відповідно до наведеної моделі дифузії водню в метал та проблем водневої деградації металу труби, потрібно проводити роботи з модернізації існуючих мереж газопроводів під його транспортування. Використання газопроводів в якості транспортних магістралей для важких контейнерних пристроїв, що рухаються в потоці повітря, також може призводити до внутрішньої корозії, що потребує реконструкції трубопроводів з метою їх збереження.

В процесі зберігання вуглекислого газу, зупинимося на вирішенні двох стратегічних задач: 1) оцінка обсягу вуглекислого газу, що може зберігатися в порожнині газопроводу; 2) визначення часу заповнення трубопроводу і темпу підвищення тиску при цьому.

Для вирішення поставлених задач створено математичну модель, яка може бути використана для прогнозування зміни тиску в газопроводі в процесі закачування вуглекислого газу з витратами  $M_i$  у відповідних точках  $x_i$

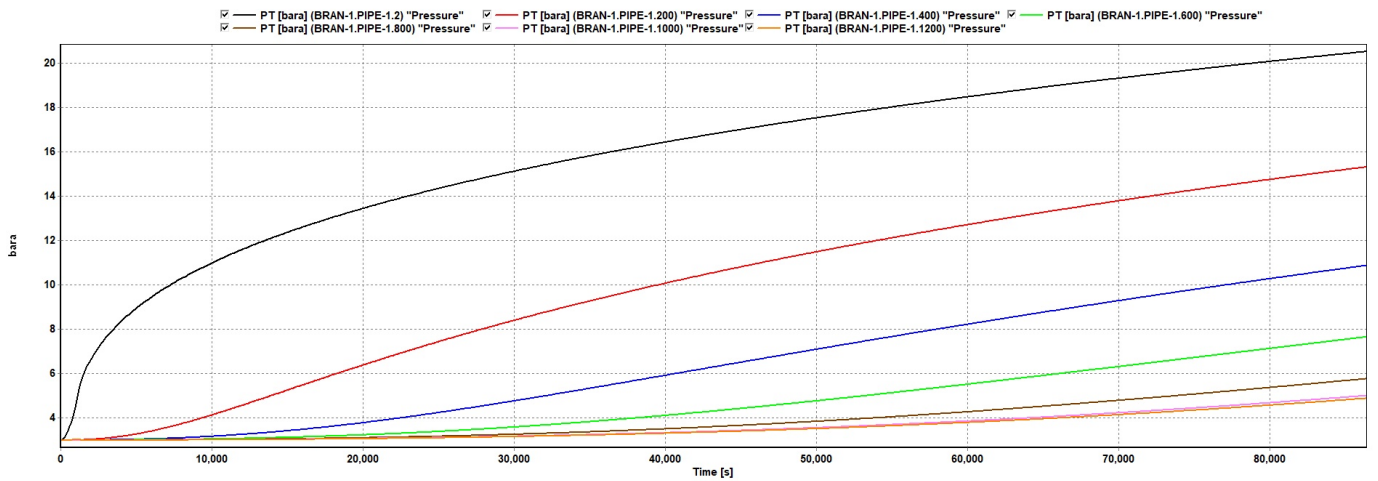
$$P(x,t) = -\frac{2}{\pi} \sum_{i=1}^n \int_0^L \left\{ \int_0^t \exp \left[ -\frac{\pi^2 n^2 \alpha}{L^2} (t-\tau) \right] \frac{c^2 M_i}{F_i} \cos \frac{\pi x_i}{L} d\tau \right\} \cos \frac{\pi x}{L} dx. \quad (15)$$

За результатами моделювання було побудовано залежності зміни тиску в трубопроводі при різній кількості точок закачування (рис.16).

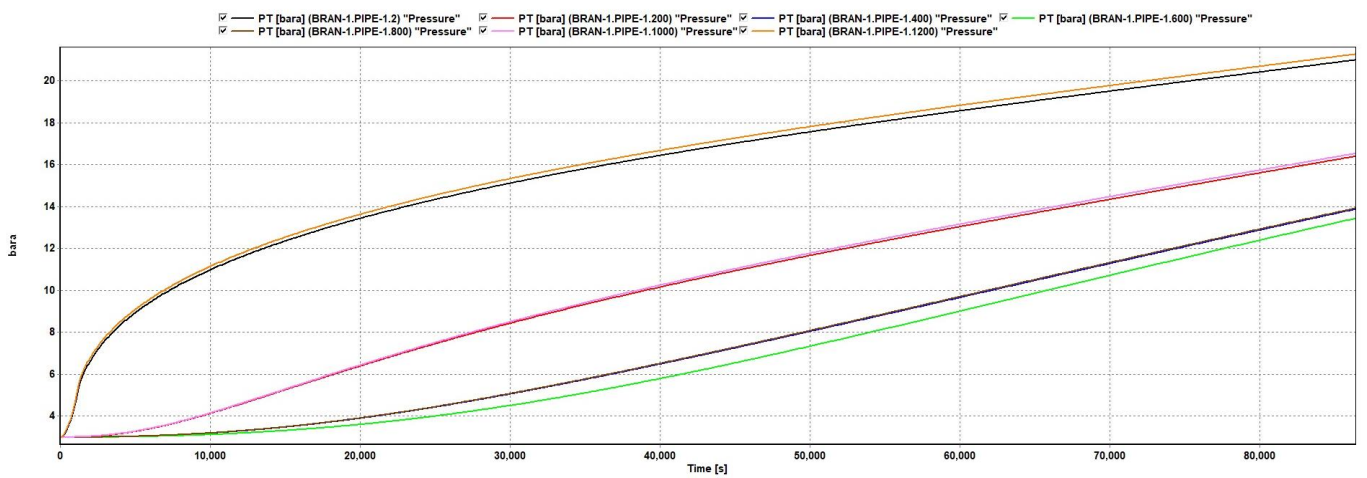


1 – підкачування в одній точці ( $x_{n1}=0$  м); 2 – підкачування в двох точках ( $x_{n1}=0$  м,  $x_{n2}=1200$  м); 3 – підкачування в чотирьох точках ( $x_{n1}=0$  м,  $x_{n2}=400$  м,  $x_{n3}=800$  м,  $x_{n4}=1200$  м)

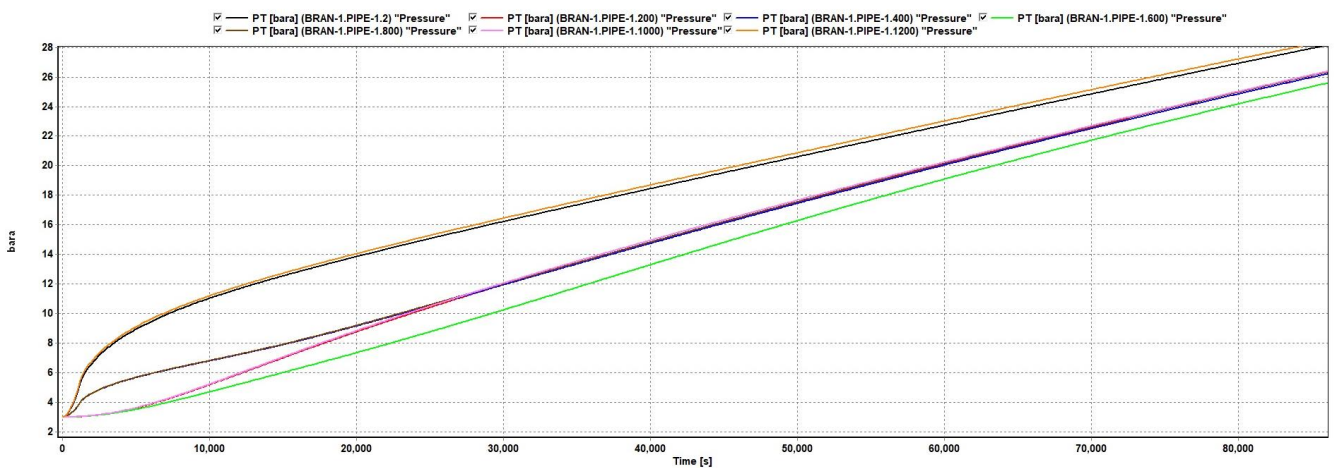
**Рисунок 16** – Графічні залежності зміни тиску в трубопроводі при різних точках закачування  $CO_2$



а)



б)



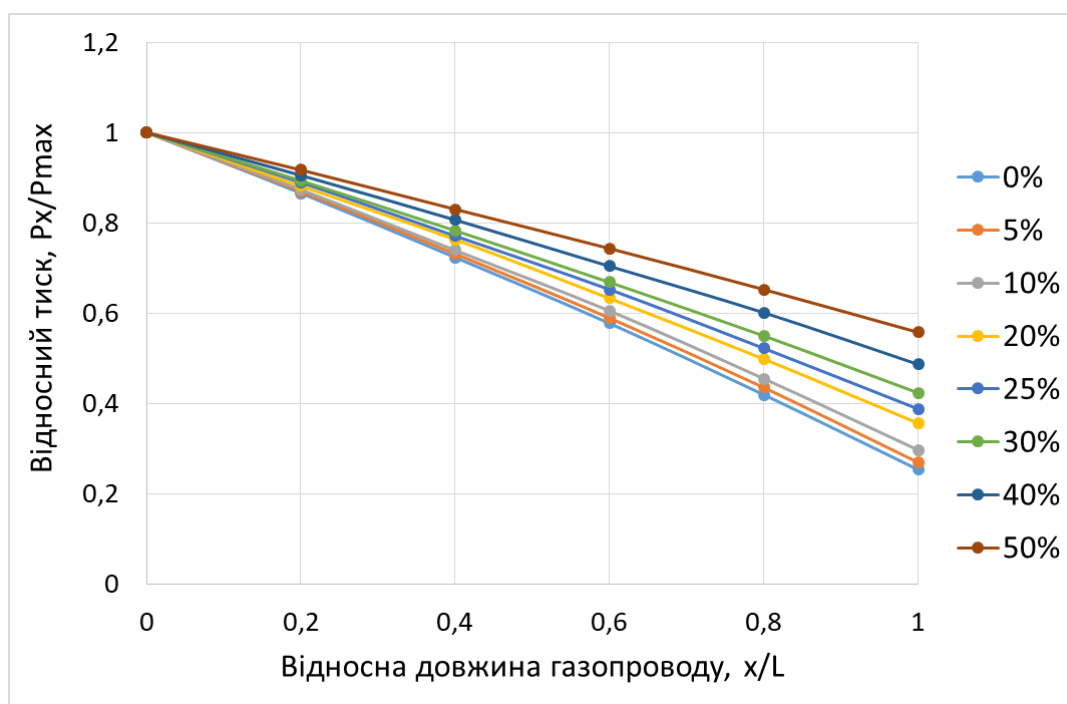
в)

а) – підкачування в одній точці; б) – підкачування в двох точках; в) – підкачування в чотирьох точках

**Рисунок 17** – Графічні залежності зміни тиску від часу в трубопроводі при різних точках закачування  $CO_2$  (за даними програми *OLHA*)

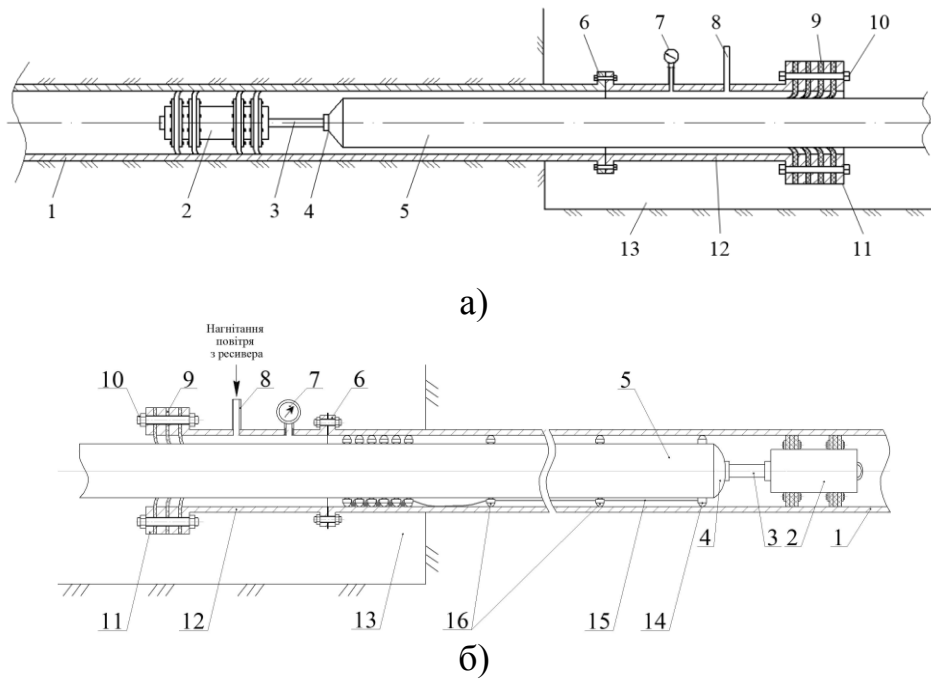
Адекватність моделі було перевірено з використанням програмного комплексу *OLHA* (рис. 17). Аналізуючи побудовані графіки режимів закачування вуглекислого газу в трубопровід діаметром 1420 мм та довжиною 1200 км, з сталою масовою витратою 300 кг/с, було встановлено, що тривалість процесу закачування до тиску 3 МПа складає, відповідно: 114 години – для закачування в одній точці, 63 год – при двох точках підкачування, 34 год – при чотирьох точках.

При аналітичних дослідженнях режимів транспортування водню з метаном встановлено, що, внаслідок зміни фізичних характеристик суміші, крива депресії тиску, при збільшенні вмісту водню, буде підніматися вгору, тобто, в кінці перегону між КС тиск буде більшим ніж при транспортуванні метану (рис. 18). Це призведе до зміни режиму роботи самої КС і, як наслідок, до зменшення енергетичних затрат на транспортування.



**Рисунок 18** – Депресія тиску по довжині газопроводу при різній концентрації водню в суміші метан-водень

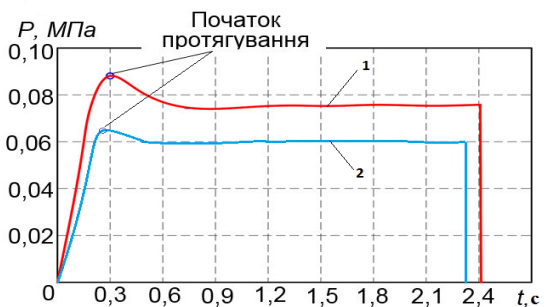
Для транспортування метано-водневих сумішей, щоб уникнути втрат водню, необхідно прокладати в порожнині існуючих трубопроводів полікарбоніві труби або наносити покриття зсередини існуючого трубопроводу. Для протягування труби в трубі було розроблено пристрій, принцип роботи якого базується на протягуванні за допомогою поршня (рис. 19, а). Труби для транспортування вуглекислого газу також повинні мати конструкцію “труба в трубі” із рівномірним заповненням міжтрубного простору теплоізоляційним матеріалом. Тому, для такого прокладання труби в трубі було розроблено пристрій для протягування із використанням опорно-центрувальних кілець (рис. 19, б).



1 – зношений сталевий трубопровід; протягуваний поліетиленовий трубопровід; 2 – поршень; 3 – штанга; 4 – оголовок; 5 – поліетиленовий трубопровід; 6 – з’єднувальні фланці; 7 – манометр; 8 – патрубок для під’єднання компресора; 9 – гумові ущільнення; 10 – болти; 11 – фланці ущільнювальної системи; 12 – трубна котушка; 13 – котлован; 14 – закріплене опорно-центрувальне кільце; 15 – з’єднувальний канат; 16 – рухомі опорно-центрувальні кільця

**Рисунок 19** – Конструкції пристроїв для протягування поршнем нового поліетиленового трубопроводу в зношений сталевий без опорно-центрувальних кілець (а) та з ними (б)

Як показали теоретичні та експериментальні дослідження (рис. 20, а) протягування трубопроводу за двома схемами, остання має певні переваги в енерговитратності процесу виконання робіт за рахунок зменшення тиску протягування (рис. 20, б).



а)

б)

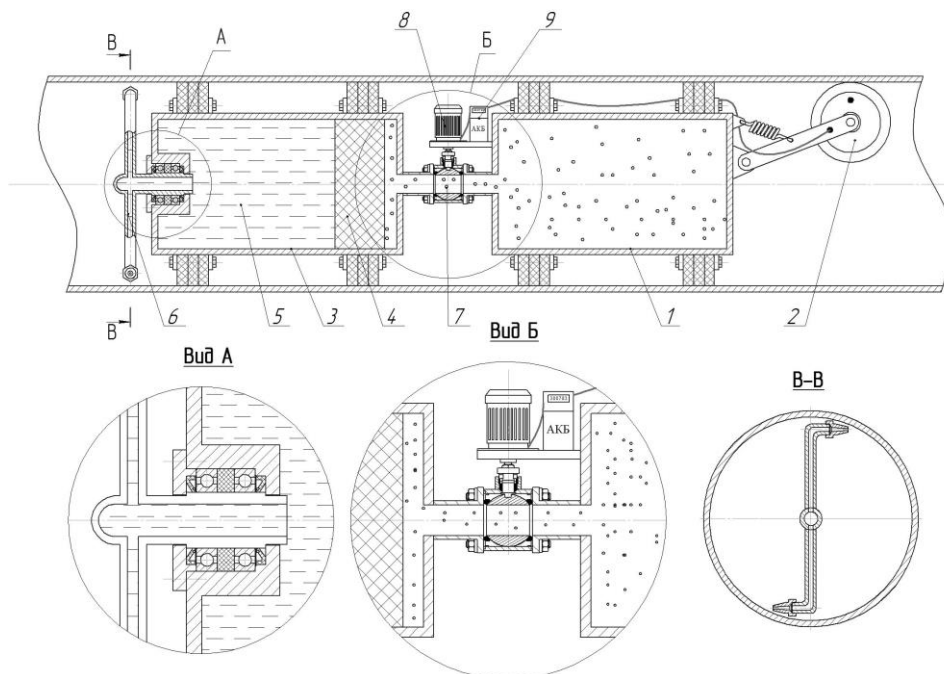
а) – експериментальна установка; б) – зміна тиску на початку трубопроводу в часі під час протягування поршнем поліетиленової труби сталевією трубою без опорно-центрувальних кілець (1) та з ними (2)

**Рисунок 20** – Дослідження динаміки протягування поршнем нового поліетиленового трубопроводу в зношений сталевий

Для нанесення антикорозійного покриття на внутрішню поверхню старого трубопроводу розроблено пристрій, зображений на рисунку 21. Даний пристрій може наносити покриття в процесі руху по трубопроводу під тиском газу. Пристрій складається з:

- передньої частини 1, яка складається з труби з манжетами, в якій міститься стиснутий газ. Попереду до частини 1 прикріплено колесо 2 за допомогою, якого можна відміряти відстань від початку ділянки газопроводу до пошкодженого місця;
- задньої частини 3, яка подібна до передньої і містить поршень 4 та антикорозійне покриття 5 в необхідній кількості. В кінці частини 2 закріплено Сегнерове колесо 6, яке здатне обертатися при витіканні антикорозійного покриття і наносити останнє на стінку газопроводу;
- обидві частини з'єднані між собою патрубком з краном 7, який відкривається за допомогою двигуна 8, що керується системою управління 9.

Пристрій працює наступним чином: через камеру пуску його запускають в газопровід, при цьому передня і задні частини відсічені краном 7. На системі управління задається необхідна відстань до ділянки, де має наноситися покриття, яка вимірюється відповідною кількістю довжин кола колеса 2. Пристрій рухається в потоці газу і, при спрацюванні лічильника імпульсів, замикаються відповідні контакти і двигун відкриває кран 7. Стиснутий газ розширюється в задню частину, тисне на поршень, який переміщує антикорозійне покриття до Сегнерового колеса, через яке покриття наноситься на стінку труби. Після нанесення всієї рідини поршень рухається до камери прийому.



**Рисунок 21** – Пристрій для нанесення покриття на внутрішню поверхню трубопроводу без зупинки перекачування продукту

Для даного пристрою розроблено модель для визначення параметрів роботи та встановлено оптимальну швидкість його руху в залежності від параметрів нанесення покриття



$$v = \frac{n \cdot \mu \cdot d_{нв}^2 \left( \sqrt{P_1 - P_p} + \sqrt{P_2 - P_p} \right)}{\left( D_{мрв}^2 - D_{мпіз}^2 \right) \sqrt{2\rho}}, \quad (16)$$

де  $d_{нв}$  – внутрішній діаметр насадок;  $P_1, P_2$  – тиск на початку та в кінці процесу нанесення;  $D_{мрв}$  – внутрішній діаметр трубопроводу;  $D_{мпіз}$  – внутрішній діаметр трубопроводу з врахуванням нанесеної ізоляції.

Маса такого пристрою з ізоляційним покриттям, як і маса контейнерів для транспортування різного виду продукції, що можуть транспортуватися відключеними ділянками лінійної частини магістральних трубопроводів, буде набагато більшою, ніж маса очисних чи інтелектуальних поршнів, тому в роботі розроблено математичну модель для оцінки динамічних навантажень на надземні ділянки трубопроводів від руху важких внутрішньотрубних пристроїв. А саме поставлено крайову задачу коливань однопрогінного балкового переходу

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + a^2 \frac{\partial^4 u}{\partial x^4} = \frac{G}{\rho A} \delta(x - vt), \quad (17)$$

$$u|_{t=0} = \frac{q}{2EI} \left( \frac{x^4}{12} - \frac{lx^3}{6} + \frac{l^2 x^2}{12} \right); \quad \frac{\partial u}{\partial t}|_{t=0} = 0; \quad (18)$$

$$u|_{x=0} = 0; \quad \frac{\partial u}{\partial x}|_{x=0} = 0; \quad u|_{x=l} = 0; \quad \frac{\partial u}{\partial x}|_{x=l} = 0. \quad (19)$$

де  $u$  – прогин осі балки у перерізі  $x$ ;  $t$  – час;  $G$  – вага вантажу, що рухається по балці;  $\delta(x-vt)$  – дельта-функція Дірака;  $a^2 = \frac{EI}{A\rho}$ ;  $\rho$  – густина матеріалу балки;  $A$  – площа поперечного перерізу балки;  $q$  – інтенсивність розподіленого навантаження;  $l$  – довжина надземної частини газопроводу;  $EI$  – жорсткість балки;  $E$  – модуль пружності матеріалу балки;  $I$  – осьовий момент інерції поперечного перерізу балки;  $x$  – координата балки.

В результаті розв'язку даної задачі отримано аналітичний вираз (20), який визначає коливання осі газопроводу на відкритій його ділянці під час проходження механічного пристрою, якщо кінці відкритої ділянки газопроводу вважати зацемленими

$$\begin{aligned} u(x, t) = & \frac{q}{24EI} \left( x^4 - 2lx^3 + l^2 x^2 \right) + \frac{qa^2 t^2}{2EI} + \frac{a^3 G}{EI v^3} \left[ \frac{v^2}{a} \left( t - \frac{x}{v} \right) - \sin \frac{v^2}{a} \left( t - \frac{x}{v} \right) \right] \times \\ & \times \eta \left( t - \frac{x}{v} \right) - \frac{8}{3\pi\sqrt{\pi}} \frac{qa^2}{EI} \int_0^t \tau \sqrt{\tau} \int_0^\infty f(y, \tau) f_1(y, x) dy d\tau - \frac{4a^2 G}{\pi\sqrt{\pi} EI v} \int_0^t \left[ \sqrt{\tau} - \frac{\sqrt{a}}{v} \sqrt{\frac{\pi}{2}} \times \right. \\ & \times \left. \left( \sin \frac{v^2 \tau}{a} S \left( \frac{v\sqrt{\tau}}{\sqrt{a}} \right) + \cos \frac{v^2 \tau}{a} C \left( \frac{v\sqrt{\tau}}{\sqrt{a}} \right) \right) \right] \int_0^\infty f(y, \tau) f_1(y, x) dy d\tau + \frac{8}{3\pi\sqrt{\pi}} \frac{qa^2}{EI} \times \\ & \times \int_0^t \tau \sqrt{\tau} \int_0^\infty f(y, \tau) f_2(y, x) dy d\tau + \frac{4a^2 G}{\pi EI v} \int_0^t \left[ \sin \frac{v^2 \tau}{a} C \left( \frac{v\sqrt{\tau}}{\sqrt{a}} \right) - \cos \frac{v^2 \tau}{a} S \left( \frac{v\sqrt{\tau}}{\sqrt{a}} \right) \right] \int_0^\infty \frac{f(y, \tau)}{y} f_3(y, x) dy d\tau, \end{aligned} \quad (20)$$

Отриманий результат дозволяє знайти переміщення будь-якої точки осі ділянки газопроводу для будь-якого моменту часу перебування очисного поршня на цій ділянці, а також знайти переміщення вказаних точок та їх швидкості в момент кінцевого перебування очисного поршня на ділянці. Ці дві величини будуть початковими умовами для дослідження вільних коливань газопроводу після проходження внутрішньотрубного пристрою через відкриту ділянку газопроводу.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі за результатами проведених досліджень вирішено важливу науково-технічну проблему забезпечення надійності газотранспортної системи на основі досліджень закономірностей протікання технологічних процесів, пов'язаних з транспортуванням газу та ремонтом газопроводів, а також оптимізація цих процесів для зменшення енерговитратності на транспортування газу в умовах обмеженого транзиту, а саме:

1. При дослідженні закономірностей зміни параметрів квазістаціонарних режимів роботи газотранспортної системи, в умовах зміни об'ємів перекачування газу, запропоновано використовувати принцип побудови математичної моделі на основі інтегральних коефіцієнтів впливу для забезпечення оперативного керування її експлуатацією, який характеризується необхідною точністю і швидкістю реалізації. При реалізації моделі встановлено, що зі зменшенням номера компресорної станції в газотранспортній системі її відключення більшою мірою впливає на ступінь зменшення пропускної здатності, а також, що ефективність регулювання режиму роботи газотранспортної системи шляхом зміни швидкості обертання роторів нагнітача тим вища, чим ближче до початку системи знаходиться компресорна станція.

2. На основі аналітичних досліджень моделі, для визначення максимальної амплітуди коливання тиску при відборі (підкачуванні) газу, проведено оцінку величини короткочасного перевищення тиску в газопроводі при стрибкоподібній зміні витрати газу, яка характерна для роботи газотранспортної системи в умовах неповного завантаження. За результатами математичного моделювання встановлено закономірності перебігу нестационарних процесів в газотранспортних системах великої протяжності зі значною кількістю компресорних станцій, зокрема доведено, що на тривалість нестационарного перехідного режиму істотно впливає розміщення відключеної КС на трасі газопроводу, причому зі збільшенням її порядкового номера в системі тривалість нестационарного процесу і величина зниження продуктивності зменшуються.

3. Запропоновано принцип оптимізації режимів роботи газотранспортних систем за умов їх неповного завантаження за критерієм мінімуму енерговитрат на транспортування газу. Було встановлено залежність достатньої кількості працюючих КС на газопроводі від величини витрати газу по трубопроводу. Результати проведених досліджень свідчать, що достатня і необхідна кількість КС для транспортування певного об'єму газу можуть відрізнятися і це пов'язано зі схемою розташування КС та з необхідністю забезпечення мінімуму енерговитрат на

компримування певного обсягу газу при відповідних граничних умовах на вході і виході станції.

4. Запропоновано, при оптимізації роботи компресорних станцій, застосовувати методи, що базуються на використанні стохастичних математичних моделей, з використанням в якості вихідної інформації передісторії експлуатації газоперекачувальних агрегатів на компресорних станціях, які дозволяють оцінити реальний технічний стан кожного ГПА і прогнозувати його залишковий ресурс та ймовірність безвідмовної роботи.

5. Проведено вибір оптимального співвідношення між енергозатратами та рівнем надійності магістральних газопроводів, на основі створеної математичної моделі, з метою забезпечення раціонального режиму експлуатації і мінімізації експлуатаційних витрат на транспортування газу з урахуванням аварійних втрат. Для оцінки реального стану ділянки газопроводу, під час виконання порівняльного аналізу окремих ділянок, з метою виведення тієї чи іншої з експлуатації, вперше введено поняття дефектного балу *DB*, який визначається розрахунковим шляхом за результатами отримання наступної інформації про: причини та історію відмов, наявність існуючих дефектів металу труби та ізоляції; вплив ґрунтів на матеріал трубопроводу; невідповідність геометричного положення осі трубопроводу нормативним документам та проекту, а також за результатами прогнозування безвідмовної роботи ділянки в майбутньому. Проведено дослідження руху двофазних потоків фасонними елементами трубопроводів, результати яких дозволяють надати практичні рекомендації щодо проведення діагностики цих елементів на втрату металу. Здійснено ранжування ґрунтових електrolітів за характеристичними показниками та встановлено найнебезпечніші для трубопровідних сталей у кожній із груп. Розроблено математичні моделі для розрахунку напружено-деформованого стану та міцності трубопроводу під час його підсаджування без підтримування та з використанням підтримуючого механізму.

6. Проведено комплексне аналітичне та експериментальне дослідження впливу технологічних процесів ремонту газопроводів із застосуванням зварювання на надійність газопроводу. Розглянуто схему термічного розкладання метану в пристінній зоні труби при проведенні ремонтно-зварювальних робіт на поверхні газопроводів; встановлено, що парціальні тиски молекулярного водню, як продукту термічного розкладання метану, можуть складати (1,0-1,5) МПа, при цьому ризик утворення холодних тріщин в металі суттєво зростатиме; запропоновано математичну модель дифузії водню в металі з урахуванням наявності у трубопровідних сталях пасток для водню, які вилучають його з дифузійного процесу; дано аналітичну оцінку кінетики росту шару евтектичного складу на локальній нагрітій ділянці внутрішньої поверхні труби; встановлено, що ділянки труби, в металі яких відбулося одночасне наводнювання і науглецювання металу внаслідок розкладання метану, можуть бути місцями з підвищеним ризиком тріщиноутворення. Проведено експериментальне дослідження ударної в'язкості трубної сталі класу міцності X70 для основного металу, зварного шва та зони термічного впливу. Результати дослідження дозволяють характеризувати процес транспортування водню

в метані як негативний, з точки зору забезпечення надійності виконання ремонтних робіт на діючих трубопроводах.

7. Показано, що, в умовах обмеженого обсягу транзиту газу, ряд елементів лінійної частини газотранспортної системи, в залежності від їх функціонального призначення і технічного стану, не доцільно використовувати за призначенням, що дає можливість їх альтернативного використання. Зокрема, запропоновано використовувати порожнину нефункціонуючих газопроводів для зберігання відходів виробництва – вуглекислого газу, з метою декарбонізації доквілля. Приведено принципи вирішення ряду проблем, що виникають при цьому (обґрунтування вибору схеми модернізації газопроводів під систему транспортування та зберігання продукту, встановлення необхідності захисту трубопроводів від шкідливого впливу середовища, вибір оптимальних режимів закачування вуглекислого газу з врахуванням надійності). Розглянуто проблеми транспортування суміші водню з метаном та встановлено тенденцію до підвищення енергоефективності процесу транспортування зі збільшенням вмісту водню.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації

1. Non-stationary processes in the gas transmission systems at compressor stations shut-down / V. Ya. Grudz, V. Ya. Grudz (junior), **V. B. Zapukhlyak**, Ya. V. Kyzymyshyn // *Journal of hydrocarbon power engineering*. 2018. № 1(5). P. 22-28. **(наукове фахове видання України)**.

2. Оптимізація режимів роботи складних газотранспортних систем в умовах їх неповного завантаження / В. Я. Грудз, Я. В. Грудз, Д. Ф. Тимків, **В. Б. Запукхляк** // *Нафтогазова галузь України*. 2019. № 1. С. 26-31. **(наукове фахове видання України)**.

3. Mathematical modeling of unsteady gas transmission system operating conditions under insufficient loading / **V. Zapukhliak**, L. Poberezhny, P. Maruschak, V. Grudz Jr., R. Stasiuk, J. Brezinová, A. Guzanová // *Energies*. 2019. Vol. 12, Issue 7. P. 1–14. **(індексується в Scopus)**.

4. Optimal gas transport management taking into account reliability factor / V. Grudz, YA. Grudz, **V. Zapukhliak**, I. Chudyk, L. Poberezhny, N. Slobodyan // *Management Systems in Production Engineering*. 2020. Vol. 28, No 3. P. 202–208. **(індексується в Scopus)**.

5. Удосконалення способу ідентифікації об'єкта підвищеної небезпеки трубопровідного транспорту газу / **В. Б. Запукхляк**, Р. Б. Стасюк, Ю. Г. Мельниченко, Т. Ю. Пиріг, Д. П. Береза // *Нафтогазова енергетика*. 2019. № 2(32). С. 43-52. **(наукове фахове видання України)**.

6. Вплив нерівномірності газоспоживання на нестационарний процес, викликаний появою витоку газу з газопроводу / **В. Б. Запукхляк**, Р. Б. Стасюк, О. І. Белей, Т. Ю. Пиріг, Т. Ф. Тутко // *Нафтогазова галузь України*. 2018. № 4. С. 22-26. **(наукове фахове видання України)**.

7. Forecasting potential risks of leakage on gas pipelines / V. Grudz, **V. Zapukhlyak**, V. Grudz (junior), L. Poberezhnyi, N. Drin, R. Stasyuk // *Scientific Journal of the TNTU*. 2019. № 4(96). С. 32-38. **(індексується в Index Copernicus)**.

8. Impact of long-term operation on the reliability and durability of transit gas pipelines / I. Okipnyi, L. Poberezhny, **V. Zapukhliak**, A. Hrytsanchuk, L. Poberezhna, A. Stanetsky, V. Kravchenko, I. Rybitskyi // *Journal of mechanical engineering*. 2020. Vol. 70, № 1. P. 115–126. **(індексується в Scopus)**.

9. Електрокорозія трубопроводів низького та середнього тиску / Л. Я. Побережний, А. І. Станецький, **В. Б. Запухляк**, А. В. Грищанчук, Р. В. Кубаль // *Нафтогазова галузь України*. 2018. №1. С. 33-36. **(наукове фахове видання України)**.

10. Ризики транспортування енергоносіїв у зонах військових дій / С. С. Трегубенко, Р. В. Кубаль, Л. Я. Побережний, **В. Б. Запухляк** // *Науковий вісник НЛТУ України*. 2018. 28(2). С. 120-123. **(індексується в Index Copernicus)**.

11. Ранжування ґрунтів за небезпекою розвитку корозійномеханічних процесів у трубопроводах на пізній стадії експлуатації / А. Станецький, П. Марущак, **В. Запухляк**, Р. Пасяка, Л. Побережний // *Проблеми корозії та протикорозійного захисту матеріалів. Спецвипуск журналу “Фізико-хімічна механіка матеріалів”*. 2018. № 12. С. 270-275. **(наукове фахове видання України)**.

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

13. Дослідження фізичної картини руху газових потоків відводами магістральних газопроводів / Я. В. Дорошенко, **В. Б. Запухляк**, Ю. І. Дорошенко, Н. М. Запухляк // *Нафтогазова галузь України*. 2017. №5. С. 25-28. **(наукове фахове видання України)**.

14. 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 Issue 1. P. 19–29. **(індексується в Scopus)**.

15. 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, Issue 2. P. 63-78. **(індексується в Scopus)**.

16. Аналіз напружено-деформованого стану трубопроводів під час підсаджування / В. Б. Запухляк, Ю. Г. Мельниченко, В. Я. Грудз, Л. Я. Побережний, Я. В. Дорошенко // *Нафтогазова енергетика*. 2020. № 2(34). С. 56-66. **(наукове фахове видання України)**.

17. Тутко Т. Ф., **Запухляк В. Б.** Визначення відстані між роликowymi опорами дюкера при його протягуванні через водну перешкоду. *Науковий вісник ІФНТУНГ*. 2013. № 2(35). С. 52-58. **(наукове фахове видання України)**.

18. **Запuxляк В. Б.** Аналіз розрахунків напружено деформованого стану трубопроводу під час виконання ізоляційно-укладальних робіт. *Прикарпатський вісник НТШ. Число.* 2014. № 1(25). С. 186-202. **(наукове фахове видання України).**

19. **Запuxляк В. Б.** Техніко-економічні аспекти проведення ремонтних робіт на діючих газопроводах. *Ефективна економіка.* 2015. № 3. **(наукове фахове видання України).**

20. Василик А. В., **Запuxляк В. Б.**, Височан М. І. До проблеми зварювальних робіт на діючих газопроводах. Частина І. *Науковий вісник ІФНТУНГ.* 2014. № 2(37). С. 170-171. **(наукове фахове видання України).**

21. До проблеми зварювальних робіт на діючих газопроводах. Частина ІІ / А. В. Василик, **В. Б. Запuxляк**, І. М. Сем'яник, Н. М. Запuxляк // *Науковий вісник ІФНТУНГ.* 2015. № 2(39). С. 131-138. **(наукове фахове видання України).**

22. Influence of test temperature on impact toughness of X70 pipe steel welds / Y. Kryzhanivskyy, L. Poberezhny, P. Maruschak, M. Lyakh, V. Slobodyan, **V. Zapukhliak** // *Procedia Structural Integrity.* 2019 Volume 16. P. 237–244. **(індексується в Scopus).**

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

24. Дорошенко Я. В., Поляруш К. А., **Запuxляк В. Б.** Експериментальні дослідження динаміки безтраншейної реконструкції трубопровідних комунікацій технологією “Тяговий поршень Т”. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ.* 2019. № 1(70). С. 25–32. **(наукове фахове видання України).**

25. 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).**

26. Проблеми і перспективи визначення витоків із трубопроводів / **В. Б. Запuxляк**, Н. М. Запuxляк, О. М. Марчук, І. І. Лукашевич // *Науковий вісник ІФНТУНГ.* 2012. – № 2(32). С. 185-188. **(наукове фахове видання України).**

27. Оцінка динамічних навантажень в розрахунках надземних ділянок газопроводів / В. Я. Грудз, **В. Б. Запuxляк**, Т. Ф. Тутко, О. Я. Дубей // *Вісник Вінницького політехнічного інституту.* 2018. № 5(140). С. 85-91. **(наукове фахове видання України).**

#### Патент

28. 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., **Запuxляк В. Б.** (патент на корисну модель).

### Праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

29. Прогнозування ресурсу безпечної експлуатації газоперекачувальних агрегатів компресорних станцій / **В. Запхляк**, Л. Побережний, В. Грудз, Р. Стасюк, А. Грицанчук, Л. Побережна // *Перспективи розвитку машинобудування та транспорту – 2019* : тези доп. І-шої міжнародної науково-технічної конференції, м. Вінниця, 13-15 травня 2019. Вінниця, 2019. С. 203-204.

30. Концепція економії природного газу на КС / А. С. Цыбенко, И. Д. Зеленчук, **В. Б. Запхляк**, И. И. Лукашевич // *Трубопроводный транспорт – 2012* : матеріали VII міжнародної учебно-науково-практичної конференції, г. Уфа, 8-9 ноября 2012. Уфа, 2012 С. 366.

31. Аналіз небезпечної речовини між запірними пристроями трубопровідних систем при виникненні аварійних ситуацій / Р. Стасюк, **В. Запхляк**, Т. Пиріг, Д. Береза. // *Нафтогазова енергетика – 2019* : матеріали міжнародної конференції, м. Івано-Франківськ, 27-31 травня 2019. Івано-Франківськ, 2019. С. 125-126.

32. Стасюк Р. Б., **Запхляк В. Б.**, Белей О. І. Визначення сумарної маси небезпечної речовини між запірними пристроями на початку та вкінці ділянок газопроводів. *Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення* : матеріали міжнародної наукової інтернет-конференції (випуск 31), м. Тернопіль, 18 вересня 2018. Тернопіль, 2018 С. 114.

33. Оптимізація постачання природного газу за критерієм надійності / В. Я. Грудз, Я. В. Грудз, В. М. Боднар, **В. Б. Запхляк**, Л. Я. Побережний // *Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи його діагностування і прогнозування* : праці VI-ої міжнародної науково-технічної конференції, м. Тернопіль, 24-27 вересня 2019. Тернопіль, 2019. С. 112-115.

34. Діагностування аварійних витоків з газопроводів на основі стохастичних моделей / В. Я. Грудз, В. Я. Грудз (молодший), **В. Б. Запхляк**, Л. Я. Побережний, Н. Я. Дрінь // *Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи його діагностування і прогнозування* : праці VI-ої міжнародної науково-технічної конференції, м. Тернопіль, 24-27 вересня 2019. Тернопіль, 2019. С. 149-152.

35. Дослідження ерозійного зношування та міцності відводів магістральних газопроводів / Я. В. Дорошенко, **В. Б. Запхляк**, Л. Я. Побережний, Ю. Г. Мельниченко, Ю. І. Дорошенко // *Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи його діагностування і прогнозування* : праці VI-ої міжнародної науково-технічної конференції, м. Тернопіль, 24-27 вересня 2019. Тернопіль, 2019. С. 153-156.

36. Поведінка матеріалу трубопроводу у ґрунтах із хлоридним типом засолення / А. І. Станецький, Л. Я. Побережний, Л. Я. Побережна, **В. Б. Запхляк** // *Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи його діагностування і прогнозування* : праці VI-ої міжнародної науково-технічної конференції, м. Тернопіль, 24-27 вересня 2019. Тернопіль, 2019. С. 50-53.

37. Поведінка матеріалу трубопроводу у ґрунтах із хлоридним типом засолення / А. І. Станецький, Л. Я. Побережний, Л. Я. Побережна, **В. Б. Запхляк** //

*Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи його діагностування і прогнозування* : праці V-ої міжнародної науково-технічної конференції, м. Тернопіль, 19-22 вересня 2017. Тернопіль, 2017. С. 40-42.

38. Ранжування ґрунтів за небезпекою розвитку корозійно-механічних процесів на трубопроводах / Л. Я. Побережний, А. І. Станецький, М. С. Полутренко, **В. Б. Запхляк** // *Нафтогазова енергетика 2017* : матеріали 6-тої міжнародної науково-технічної конференції, м. Івано-Франківськ, 15-19 травня 2017. Івано-Франківськ, 2017. С. 355.

39. **В. Б. Запхляк**. Аналіз розрахунку напруженого стану трубопроводів під час капітального ремонту. Матеріали двадцять сьомої наукової сесії наукового товариства ім. Шевченка, м. Івано-Франківськ, 3-22 березня 2016. Івано-Франківськ, 2016.

40. **Запхляк В. Б.**, Марчук О. М., Грицанчук А. В. Аналіз розрахунку напруженого стану трубопроводів під час капітального ремонту. *Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи його діагностування і прогнозування* : праці V-ої міжнародної науково-технічної конференції, м. Тернопіль, 19-22 вересня 2017. Тернопіль, 2017. С. 191-194.

41. **Запхляк В.**, Запхляк Н., Цюрак В. Аналіз впливу силових факторів на просторове положення трубопроводу в ґрунті. Матеріали двадцять дев'ятої наукової сесії наукового товариства ім. Шевченка, м. Івано-Франківськ, 5-27 березня 2018. Івано-Франківськ, 2018.

42. Аналіз причин невідповідності проекту глибини закладання експлуатованих трубопроводів / **В. Запхляк**, Л. Побережний, В. Мархалевич, Н. Запхляк // *Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій* : матеріали Міжнародної науково-технічної конференції до 100-річчя з дня заснування НАН України та на вшанування пам'яті Івана Пулюя (100-річчя з дня смерті), м. Тернопіль, 23–24 травня 2018. Тернопіль, 2018. С. 50-51.

43. **Запхляк В. Б.**, Мельниченко Ю. Г., Кузь А. Р. Проблемы опускания действующего трубопровода на проектную отметку при ремонте. *Трубопроводный транспорт – 2016* : материалы XI-ой международной учебно-научно-практической конференции , г. Уфа, 24-25 мая 2016. Уфа, 2016. С. 244.

44. Моделювання напружено-деформованого стану трубопроводів під час їх опускання на проектну відмітку із застосуванням трубоукладачів / **В. Б. Запхляк**, Ю. Г. Мельниченко, Н. М. Запхляк, О. М. Марчук // *Інноваційні підходи і сучасна наука* : матеріали II-ої міжнародної конференції, м. Київ, 31 травня 2016. Київ, 2016 С. 75.

45. Providing operability of gas pipelines in combat zones / **V. Zapukhliak**, V. Grudz, Yu. Melnychenko, A. Stanetsky, M. Polutrenko, L. Poberezhny // *Prospects for the development of mechanical engineering and transport – 2019* : abstracts of I-th international scientific and technical conference, с. Vinnytsia, 13-15 may 2019. Vinnytsia, 2019. P. 204-205.

46. **Запхляк В. Б.**, Марчук О. М., Грицанчук А. В. Аналіз розрахунку напруженого стану трубопроводів під час капітального ремонту. *Пошкодження*



матеріалів під час експлуатації, методи його діагностування і прогнозування : матеріали VI-ої міжнародної науково-технічної конференції, м. Тернопіль, 24-27 вересня 2019. Тернопіль, 2019. С. 191-194.

47. Побережний Л., **Запухляк В.**, Побережна Л. Прогнозування напружено-деформованого стану трубопроводу при просіданнях структурно нестійких ґрунтів. Матеріали двадцять дев'ятої наукової сесії наукового товариства ім. Шевченка, м. Івано-Франківськ, 5-27 березня 2018. Івано-Франківськ, 2018.

48. Побережний Л., **Запухляк В.**, Побережна Л.. Теоретико-експериментальне моделювання напружено-деформованого стану трубопроводів на зсувонебезпечних ділянках. Матеріали тридцятої наукової сесії наукового товариства ім. Шевченка, м. Івано-Франківськ, 28 лютого - 21 березня 2019. Івано-Франківськ, 2019.

49. Проблемы сварочных работ в процессе врезки в действующие газопроводы / А. В. Василик, **В. Б. Запухляк**, Н. М. Запухляк, Р. Р. Романків // *Трубопроводный транспорт – 2016* : Материалы XI международной учебно-научно-практической конференции, г. Уфа, 24-25 мая 2016. Уфа, 2016. С. 219.

50. Influence of pipeline steel texture on macro- and micromechanisms of its impact fracture / Ye. Kryzhanivskyy, L. Poberezhny, P. Maruschak, M. Lyakh, V. Slobodyan, **V. Zapukhliak** // *Fracture mechanics of materials and structural integrity : abstracts of 6-th International Conference*, с. Lviv, 3-6 June 2019. Lviv, 2019. P. 122-123.

51. Використання української газотранспортної системи для підвищення енергетичної безпеки Євросоюзу / П. Марущак, Л. Побережний, **В. Запухляк**, А. Грицанчук // Матеріали двадцять дев'ятої наукової сесії наукового товариства ім. Шевченка, м. Івано-Франківськ, 5-27 березня 2018. Івано-Франківськ, 2018.

52. Марчук О. М., **Запухляк В. Б.**, Мельник Р. М. Про ремонт підводних переходів трубопроводів. *Нафтогазова енергетика 2013* : Матеріали міжнародної науково-технічної конференції, м. Івано-Франківськ, 7-11 жовтня 2013. м. Івано-Франківськ, 2013. С. 440.

53. **Запухляк В. Б.**, Марчук О. М., Савчук Н. М. Концепції ремонту трубопроводів у важкодоступних місцях. *Нафтогазова освіта та наука стан та перспективи* : матеріали міжнародної науково-технічної конференції, м. Івано-Франківськ, 10-12 грудня 2014. Івано-Франківськ, 2014. С. 262.

54. Удосконалення способу капітального ремонту трубопроводів / **В. Б. Запухляк**, Л. Я. Побережний, Н. М. Запухляк, О. М. Марчук // *Нафтогазова енергетика 2017* : матеріали 6-тої міжнародної науково-технічної конференції, Івано-Франківськ, 15-19 травня 2017. Івано-Франківськ, 2017. С. 377.

55. Грудз В., Побережний Л., **Запухляк В.** Проблеми захисту внутрішньої порожнини газопроводів від корозії. Матеріали тридцятої наукової сесії наукового товариства ім. Шевченка, м. Івано-Франківськ, 28 лютого - 21 березня 2019. Івано-Франківськ, 2019.

56. **Запухляк В.** Розроблення технології для нанесення покриття на внутрішню поверхню трубопроводу з метою захисту від корозії. *Нафтогазова*

*енергетика – 2019* : тези доп. міжнародної конференції, м. Івано-Франківськ, 27-31 травня 2019. Івано-Франківськ, 2019. С. 212.

57. Підвищення якості очистки газопроводів / **В. Б. Запухляк**, А. С. Цибенко, Н. М. Запухляк, С. В. Шургот // *Проблеми і перспективи транспортування нафти і газу* : матеріали міжнародної науково-технічної конференції, м. Івано-Франківськ, 15-18 травня 2012. Івано-Франківськ, 2012. С. 75.

58. Струк А. В., Шиптур Т. Р., **Запухляк В. Б.** Розробка пристрою для очистки газопроводів. *Проблеми і перспективи транспортування нафти і газу* : Матеріали міжнародної науково-технічної конференції, м. Івано-Франківськ. 15-18 травня 2012. Івано-Франківськ, 2012. С. 121.

59. Грудз В. Я., **Запухляк В. Б.**, Самуляк Н. П. Сооружение переходов трубопроводов поверх существующих. *Трубопроводный транспорт – 2016* : материалы XI-ой международной учебно-научно-практической конференции, г. Уфа, 24-25 мая 2016. Уфа, 2016. С. 235.

### **Опубліковані праці, які додатково відображають наукові результати дисертації**

60. Грудз В. Я., Грудз Я. В., Гораль Л. Т., **Запухляк В. Б.** та ін.. Комплексна галузева методика. Методи прогнозування режимів газотранспортної системи в умовах неповного завантаження і підрахунку запасів газу в трубах. Затверджено 03.03.2020. Івано-Франківськ : АТ "Укртрансгаз", 2020. 83 с.

61. 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.

62. Грудз В. Я., **Запухляк В. Б.**, Стасюк Р. Б., Креховецький В. Ю., Запухляк Н. М. Рекомендації щодо проведення робіт із підсаджування газопроводу діаметром 1420 мм. Затверджено 25.09.2017. Івано-Франківськ : ПАТ "Прикарпаттрансгаз", 2017. 24 с.

63. Грудз В. Я., **Запухляк В. Б.**, Височанський І. І. та ін.. Комплексна галузева методика. Розрахунок напружено-деформованого стану складних систем надземних переходів. Затверджено 01.02.2016. Івано-Франківськ : ТзОВ "ЗАХІДТЕХНОГАЗ", 2016. 93 с.

64. Грудз В. Я., **Запухляк 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.

### **АНОТАЦІЯ**

**Запухляк В. Б. Забезпечення надійності різновекторної газотранспортної системи за умови обмежених обсягів транзиту. – 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, 2021.

Дисертаційна робота присвячена: дослідженню режимів роботи газотранспортної системи в умовах обмеженого транзиту; визначенню оптимальних та надійних параметрів роботи газоперекачувальних агрегатів, компресорних станцій, лінійних ділянок газопроводів при зменшенні об'ємів перекачування газу; дослідженню технологічних процесів, пов'язаних з виконанням ремонтних робіт для підвищення надійності газопроводів; розробленню альтернативних пропозицій використання окремих ланок газотранспортної системи непрацюючих внаслідок неповного її завантаження; розробленню технік та технологій для модернізації газопроводів під транспортування альтернативних видів продукту та дослідженню режимів експлуатації таких газопроводів.

У дисертаційній роботі отримано залежність, що відображає характер коливань в часі масової витрати газу в початковому і кінцевому перерізі газопроводу, викликаних виключенням з режиму роботи окремих компресорних станцій. За результатами чисельних досліджень визначено оптимальну кількість працюючих компресорних станцій для транспортування певного об'єму газу, за симетричних та несиметричних схем їх розміщення. Вирішено технологічну задачу оптимального планування перекачування газу з врахуванням показників надійності компресорних станцій та лінійних ділянок та вирішено ряд наукових задач, що пов'язані з переведенням газопроводів на транспортування інших видів продукту.

**Ключові слова:** газотранспортна система, газодинамічний процес, газоперекачувальний агрегат, компресорна станція, лінійна частина, надійність, напружений стан, неповне завантаження, оптимізація.

## АННОТАЦІЯ

**Запухляк В. Б. Обеспечение надежности разновекторной газотранспортной системы при условии ограниченных объемов транзита. - Квалификационный 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, 2021.

Диссертация посвящена: исследованию режимов работы газотранспортной системы в условиях ограниченного транзита; определению оптимальных и надежных параметров работы газоперекачивающих агрегатов, компрессорных станций, линейных участков газопроводов при уменьшении объемов перекачки газа; исследованию технологических процессов, связанных с выполнением ремонтных работ для повышения надежности газопроводов; разработке альтернативных предложений использования отдельных звеньев газотранспортной системы

неработающих вследствие неполной ее загрузки; разработке техник и технологий для модернизации газопроводов под транспортировку альтернативных видов продукта и исследований режимов эксплуатации таких газопроводов.

В диссертационной работе получены зависимость, отражающая характер колебаний во времени массового расхода газа в начальном и конечном сечении газопровода, вызванных исключением из режима работы отдельных компрессорных станций. По результатам многочисленных исследований определено оптимальное количество работающих компрессорных станций для транспортировки определенного объема газа, по симметричных и несимметричных схем их размещения. Решено технологическую задачу оптимального планирования перекачки газа, с учетом показателей надежности компрессорных станций и линейных участков, и решен ряд научных задач, связанных с переводом газопроводов на транспортировку других видов продукта.

**Ключевые слова:** газотранспортная система, газодинамический процесс, газоперекачивающий агрегат, компрессорная станция, линейная часть, надежность, напряженное состояние, неполная загрузка, оптимизация.

**Vasyl Zapukhliak Ensuring the reliability of the multi-vector gas transmission system under conditions of limited transit volumes. - Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.**

The dissertation on competition of a scientific degree of the doctor of technical sciences on a specialty 05.15.13 - pipeline transport, oil and gas storages. - Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ministry of Education and Science of Ukraine, Ivano-Frankivsk, 2021.

The dissertation work is devoted to: research of modes of operation of the gas transmission system in the conditions of limited transit; determination of optimal and reliable parameters of gas compressor units, compressor stations, main line sections of gas pipelines while reducing the volumes of gas transmission; research of technological processes related to conducting of repairs with a purpose of increasing the reliability of gas pipelines; development of alternative proposals for the certain parts utilizing of gas transmission system been idling due to its incomplete loading; development of techniques and technologies of gas pipelines modernization with the purpose of alternative products transportation and research of modes of such gas pipelines operation.

It is estimated the problem of calculating the modes of operation of partially loaded complex gas transmission system containing a range of main line sections and a compressor stations, that all together could be represented by serially and parallelly connected units and whose characteristics determine the system capacity. The results of analytical studies of the flow nature and transient processes duration in complex gas transmission systems caused by the exclusion from operation individual compressor stations are presented. The mathematical model of the gas pipeline is composed considering the influence of compressor stations based on classical equations of gas flow and continuity with applying the Dirac function of the source. Obtained graphical trends of the gas transmission system

flowrate at its starting and ending point showed the influence of compressor stations position in the gas transmission system in particular its number in series on the nature of transient processes, more towards their duration, caused by stations shutdown.

A mathematical model has been developed to determine a number of gas compressor units and compressor stations sufficient for gas transmission in conditions of limited transit volumes. It has been established that the sufficient and required number of compressor stations for transportation of certain volume of natural gas may differ that is caused generally by the special position of the stations. The analysis of influence of possible shutdowns of compressor stations or separate compressor units, and also, units RPM regulation on energy efficiency and reliability of operating modes of gas pipelines at symmetric and asymmetric position of operated CS in the system is carried out. Methods of stochastic mathematical modeling using under source information the prehistory of operation of gas compressor units at compressor stations was applied to evaluate the actual technical state of the GCU and predict its residual lifetime and uptime probability. A mathematical model has been developed that links the indicators of reliability supplying of natural gas to consumers with the indicators of operation cost for gas compressor units and the predicted losses caused by cutting the production delivery volumes to consumers.

A mathematical model has been developed that allows to estimate the real state of the gas pipeline section during the comparative analysis of individual sections with the purpose of decommissioning some of the one. It is proposed to introduce the concept of defective score DB, which is determined after providing calculations based on information about pipeline sections failures and their causes in the past, the presence of existing defects in the steel pipe and insulation, the impact of soils on the pipeline material, as well as the results of predicting the fault-free operation of the section in the future. In order to improve the quality of erosion damage identification of the pipeline elements and more effective diagnostics of their wall thickness reduction a study of the movement of two-phase flows across pipeline elements was carried out on a multifunctional experimental stand-model of the pipeline. The main regularities of the influence of long-term operation on the resistance to deformation of tubular steels in soils of chloride and chloride-sulphate types of salinization are investigated. Soil electrolytes were ranked according to characteristic parameters and the most dangerous for degraded pipe steels in each of the groups were identified. Mathematical modeling of the stress-strain state of the pipeline during the restoration of its design position without discharging the product is carried out.

There was carried out theoretical studies of the processes associated with welding and restoration works on gas pipelines without interrupting the natural gas transportation to restore their efficiency and to identify possible risks associated with such processes. The scheme of thermal decomposition of methane in the near-surface layer on the heated area of the welding zone is considered. Graphs of solubility of hydrogen in iron at different partial pressures of molecular hydrogen in a gas mixture are calculated and composed. The general processes of solubility of hydrogen in metal and the development of hydrogen embrittlement of tubular steels are considered. The processes of hydrogenation and carburization of the metal of main gas pipelines during thermal decomposition of methane on the heated area of the inner surface of the pipes during welding directly under gas

pressure are simulated. Experimental studies of the impact strength of tubular steel 17G1S-U, strength class X70 are provided. The influence of the test temperature on the impact strength of tubular steel of class X70 is investigated. Samples from the mother pipe and samples cut from the weld joints were used.

There was analyzed possible problems that arise after transferring idling or incompletely loaded gas pipelines for transportation of alternative types of products: carbon dioxide, a mixture of hydrogen and methane or for transportation of cargo containers. Among the outlined problems there is the need to protect steel pipelines from the harmful action of each type of the environments stated above. A mathematical model of the process of carbon dioxide injection into the pipeline is developed, the dependences of pressure, temperature and mass flow rate of CO<sub>2</sub> from the length of the pipeline in time are composed. In the study of hydrogen and methane mixture transportation it was indicated a general positive trend of increasing the energy consumption efficiency during transportation of such mixture. Generally, four technologies of gas pipelines modernization are offered that consider protection of pipelines from hydrogenation, corrosion and allows to change modes of gas pipelines operation, when transported carbon dioxide or hydrogen, in terms of increasing of their efficiency.

A mathematical model has been developed to predict the nature of forced oscillations of the above-ground section of the pipeline during the passage of mechanical devices through the pipeline, which allows to prevent violations of the stability of air transitions during the movement of heavy inline devices.

Keywords: gas transmission system, gas dynamic process, gas compressor unit, compressor station, main line, reliability, stress state, incomplete loading, optimization.