

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

**РИБИЦЬКИЙ Ігор Володимирович**



УДК 621.643.053

**НОВІТНІ МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ КОНТРОЛЮ**  
**ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ПАРАМЕТРІВ**  
**ГАЗОПРОВІДНИХ СИСТЕМ**

Спеціальність 05.11.13 – Прилади і методи контролю  
та визначення складу речовин

**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 МОН України, м. Івано-Франківськ.

Науковий консультант – доктор технічних наук, професор  
**Карпаш Олег Михайлович**,  
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, професор кафедри енергетичного менеджменту і технічної діагностики.

Офіційні опоненти: – доктор технічних наук, професор,  
**Куц Юрій Васильович**,  
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», професор кафедри приладів і систем неруйнівного контролю;

– доктор технічних наук, п.н.с,  
**Учанін Валентин Миколайович**,  
Фізико-механічний інститут імені Г.В. Карпенка, старший науковий співробітник, відділ №9 методів відбору й обробки діагностичних сигналів;

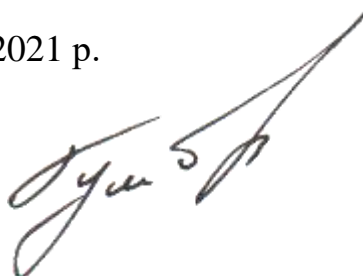
– доктор технічних наук, професор,  
**Древецький Володимир Володимирович**,  
Національний університет водного господарства та природо-користування, завідувач кафедри автоматизації, електротехнічних та комп'ютерно-інтегрованих технологій.

Захист відбудеться 25 лютого 2021 р. об 12<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 20.052.03 в Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу за адресою: 760194, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська 15; тел. +38 (342) 54-42-66.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу (760194, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15)

Автореферат розісланий « 15 » січня 2021 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради



Т.В. Гуменюк

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Обґрунтування вибору теми дослідження.** Трубопровідна система газотранспортної промисловості України є однією з найбільших і найпотужніших у Європі. Проте значний рівень спрацювання (понад 70%), низька енергоефективність обладнання, що використовується та відсутність фінансування на своєчасне його оновлення (частина обладнання експлуатується понад 30 років без повної заміни), призводить до появи значних ризиків його безпечного експлуатування та завдання шкоди життю людей, майну, навколишньому середовищу, чуттєвого зниження рівня енергобезпеки окремих галузей промисловості. Окрім того, слід взяти до уваги, що вітчизняна газотранспортна система входить в п'ятірку найбільш енергоємних виробництв в Україні і споживає більше 2% енергоресурсів.

Технічний стан трубопроводів, компресорних агрегатів, періодичність їх обслуговування та ремонту, якість транспортованого продукту, завантаженість системи в цілому впливають на надійність та ефективність роботи трубопровідного транспорту. Практика світового та вітчизняного досвіду свідчить, що найбільш раціональним виходом з ситуації, що склалася, є розроблення та впровадження систем та технологій комплексного контролю технічного стану об'єктів за сукупністю параметрів з одночасним їх врахуванням з метою виявлення дефектів, попередження аварійних ситуацій та завчасного проведення ремонтних робіт.

В розвиток методів та засобів контролю технічного стану трубопроводів та обладнання значний внесок вклали вітчизняні Патон Б.Є., Лобанов Л.М., Бабак В.П., Троїцький В.О., Назарчук З.Т., Скальський В.Р., Крижанівський Є.І., Карпаш О.М., Древецький В.В. Учанін В.М., Куц Ю.В., Карпаш М.О. Сучков Г.М. Маєвський С.М., Заміховський Л.М, Яцун М.А., Фомічов С.К., та зарубіжні вчені Richard Heinberg, Kydes A.S., Горкунов Е.С., Charles Hall, Мазур Н.И., Иванцов О.М., Щербінін В.Е., Гурвич А.К., Мужичський В.Ф., Мігун Н.П., Гумеров А.Г., Беднаж С., А. Мітра, Б. Венкатраман, Charles A. S. Hall та інші.

Дослідження згаданих вчених в основному зосереджувалися на розробленні окремо взятих технічних засобів та технологій контролю технічного стану, але в них не приділяли достатньої уваги комплексному підходу контролю технічного стану за сукупністю інформативних параметрів, а також впливу зміни цих параметрів на режими роботи газотранспортної системи.

Тому для газотранспортних систем дослідження новітніх методів контролю експлуатаційних параметрів з їх одночасним врахуванням та їх впливом на режим роботи газотранспортної системи є актуальною науково-технічною проблемою.

**Зв'язок з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана на кафедрі енергетичного менеджменту і технічної діагностики Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. Матеріали дисертації є складовою частиною більше 15 науково-дослідних робіт, що особисто виконувались здобувачем, як науковим керівником і виконавцем держбюджетних та госпдоговірних робіт, основними з яких за темами є:

«Розроблення методів технічного діагностування енергетичних об'єктів та технологій контролю параметрів енергоресурсів» (номер державної реєстрації – 0114U000730, термін виконання – 2018–2021 рр.); договір №М/193 «Експрес метод контролю якості природного газу» згідно з наказом Державного агентства з питань науки, інновацій та інформатизації України від 12.04.2012р. №66 (номер держреєстрації - 0112U003624, термін виконання 2012 рік); Project using BPG funds provided by U.S. Civilian Research and Development Foundation, UKЕ1-9074-IF-12 «Express Method of Natural Gas Quality Control» (термін виконання 2012 рік); «Обстеження стану металу труб визначених ділянок переходу аміакопроводу через Тілігульський лиман з метою визначення механічних характеристик (ударна в'язкість, границя плинності)» (термін виконання – 2010–2011 рр.); договір №1611000599 (185/2016) «Розроблення СОУ «Метрологія. Природний газ. Визначення нижчої теплоти згоряння кореляційним методом» (термін виконання – 2016-2017рр.); договір №33/2016 «Розроблення методики визначення витоків природного газу на АГНКС ПАТ «КОНЦЕРН ГАЛНАФТОГАЗ. Вимірювання об'ємів витоків природного газу на АГНКС №1, с. Дем'янів» (номер держреєстрації 0116 U 005725, термін виконання – 2016р.); договір 5/2009 «Оцінка напружено-деформованого стану МГП "Союз" на переході р. Айдар (1239 км.), визначення активності зсуву ґрунтів на ділянці 1152-1154 км. та оцінка залишкового ресурсу досліджених ділянок» (№ держреєстрації 0109U004632, термін виконання – 2009–2010 рр.); держбюджетна Д-11-11-П «Розроблення новітніх неруйнівних методів діагностики та моніторингу деградації матеріалів металоконструкцій довготривалої експлуатації» (№ держреєстрації 0111U002999, термін виконання – 2015р.).

**Мета і завдання дослідження.** Метою наукового дослідження є вирішення актуальної науково-прикладної проблеми в галузі методів та приладів контролю – розроблення новітніх засобів контролю експлуатаційних параметрів газопровідних систем шляхом дослідження нових інформативних параметрів контролю як технічного стану так і режиму роботи газопровідних систем.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити такі **наукові завдання**:

- проаналізувати сучасний стан та тенденції розвитку методів, засобів та технологій неруйнівного контролю параметрів експлуатації, обслуговування та ремонту газопровідних систем та обладнання, здійснити аналіз напрямків їх удосконалення з використанням нових інформативних параметрів;

- провести теоретичні та експериментальні дослідження фізичних процесів які відбуваються при експлуатації газопровідних систем з метою обґрунтування можливості використання нових інформативних параметрів контролю їх технічного стану;

- провести математичне моделювання процесу впливу дефектів трубопроводних систем, в тому числі таких як негерметичність та порушення геометрії, на експлуатаційні показники та ефективність роботи газопровідних систем;

– провести теоретичні дослідження процесу впливу накопичення нетехнологічних скупчень в порожнині газопроводу на експлуатаційні показники та ефективність його роботи, удосконалити метод виявлення таких скупчень та провести експериментальне його дослідження;

– провести математичне моделювання впливу властивостей природного газу, що транспортуються в трубопроводі, на експлуатаційні показники та енергоефективність роботи газопровідних систем з метою вибору напрямку удосконалення методів та приладів контролю властивостей природного газу;

– розробити нові та удосконалити існуючі методи, технології та технічні засоби контролю наявності та величини витоків природного газу з газопровідних систем та обладнання, а також провести їх промислову апробацію;

– удосконалити технології та технічні засоби контролю нижчої та розробити технології оцінки вищої теплоти згоряння природного гагу та провести їх промислову апробацію з метою дослідження впливу якісних показників природного газу на енергоефективність роботи газопровідних систем та обладнання.

**Об'єктом дослідження** є газопровідні системи та обладнання.

**Предмет дослідження** є методи та засоби контролю параметрів технічного стану газопровідних систем та обладнання.

**Методи дослідження:** теоретичні дослідження виконано з використанням методів розв'язання нелінійних задач встановлення кореляційних зв'язків між інформативними параметрами технічного стану газопровідних систем та досліджуваними характеристиками (фізико-хімічними властивостями природного газу, наявності дефектів типу порушення геометрії, герметичності, наскрізні дефекти, нетехнологічні скупчення в порожнині газопроводів), а також методів аналітичного та чисельного розв'язання систем лінійних та диференційних рівнянь у часткових похідних, що побудовані на основі математичного аналізу та експериментальних даних роботи багатопараметрових вимірювальних систем, методах відбирання та оброблення первинної інформації. Експериментальні дослідження розроблених технологій та удосконалених технічних засобів проведено із застосуванням теорії вимірювань і планування багатфакторного експерименту, кореляційного аналізу, математичної статистики, методів числового оброблення результатів експериментів. Результати експериментальних та теоретичних досліджень було проаналізовано із застосуванням спеціалізованого програмного забезпечення. Експериментальні дослідження проводилися із використанням стандартних та розроблених методик.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає у вирішенні важливої науково-прикладної проблеми забезпечення надійної та ефективної експлуатації газопровідних систем та обладнання шляхом розроблення наукових основ новітніх методів контролю параметрів їх експлуатації. У ході дисертаційних досліджень отримано наступні наукові результати.

1. Вперше встановлена залежність між експлуатаційними параметрами газопровідних систем та наявністю наскрізних дефектів малого розміру, через які відбувається витік, що є джерелом турбулентності, створеного локального

опору потоку і зменшення пропускної здатності газопровідних систем, що дозволяє оцінити режим та ефективність роботи газопроводів.

2. Вперше встановлено взаємозалежності впливу раніше не врахованих параметрів (зміна геометричних характеристик перерізу газопроводу, наявність нетехнологічних скупчень в порожнині трубопроводу, теплотворна здатність транспортованого природного газу) на режим роботи (пропускну здатність) трубопроводу, що доцільно використати при визначенні подальших заходів для забезпечення ефективної роботи газотранспортної системи.

3. Розроблено новий метод вимірювання теплоти згоряння природного газу, що дає змогу проводити вимірювання вищої теплоти згоряння природного газу шляхом застосування встановленої залежності значення вищої теплоти згоряння від вмісту діоксиду вуглецю, швидкості поширення ультразвукових коливань в пробі природного газу та значення нижчої теплоти згоряння, що забезпечує підвищення точності та розширення діапазону вимірювань, а також вимоги третього енергопакету ЄС.

4. Удосконалено метод вимірювання рівня скупчень рідини в порожнині трубопроводу шляхом застосування при обробці інформаційних сигналів фільтрів Савіцького-Голея, що дозволило проводити вимірювання рівня різних рідин окремо в робочих режимах транспортування газу газопроводами, підвищити інформативність та зменшити похибку вимірювань.

5. Удосконалено метод вимірювання об'ємів витоків природного газу в системах газопостачання шляхом розроблення конструкцій спеціальних вимірювальних ділянок та застосування встановленої залежності швидкості потоку через вимірювальну ділянку та об'єму витоків з газопроводу, що дало можливість застосування методу для вимірювання витоків широкому діапазоні, зокрема як мікро, так і дуже великих, перед аварійних витоків.

6. Отримали подальший розвиток класичні методи технічного діагностування та прогнозування технічного стану газопровідних систем та обладнання з використанням структурних акустичних шумів як структурно чутливих інформативних параметрів, що створило передумови спрощення виконання технічних засобів діагностики, розширення їх можливостей та підвищення достовірності контролю.

**Практичне значення одержаних результатів.** Розроблені нові та удосконалено існуючі технічні засоби, технології, методики та нормативні документи, що регулюють використання розроблених методів контролю технічного стану газопровідних систем та обладнання за комплексом діагностичних параметрів.

Розроблено, виготовлено, проведено промислові випробування (в умовах УМГ «Прикарпаттрансгаз» ПАТ «Укртрансгаз», ПАТ «Івано-Франківськгаз») та передано в експлуатацію новий прилад для контролю якісних параметрів, зокрема вищої та нижчої теплоти згоряння, природного газу GAS-Hi-Q, а також проект СОУ «Газ природний горючий. Експрес-контроль теплоти згоряння. Методика», який регламентує порядок проведення вимірювань з використанням розробленого приладу.

Розроблено, виготовлено та проведено багаторічні лабораторні та промислові випробування системи моніторингу накопичувань рідини в порожнинах газопроводів, а також розроблено та затверджено технічні умови на її виготовлення (ТУ У 26.5-02070855-001:2016 Система моніторингу накопичень рідини. Технічні умови).

Розроблено та впроваджено нормативний документ СОУ 49.5-30019801-137:2017 Метрологія. Природний газ. Вимірювання нижчої теплоти згоряння кореляційним методом.

Розроблено Методику визначення об'ємів витоків природного газу на АГНКС та проведено з використанням зазначеної методики вимірювання об'ємів витоків на обладнання АГНКС ПАТ «КОНЦЕРН ГАЛНАФТОГАЗ».

Розроблено та погоджено із ДП «Івано-Франківськстандартметрологія», ННЦ «Інститут метрології» та Карпатським експертно-технічним центром «Методику виконання вимірювань границі плинності конструкційних (трубопровідних) сталей» та «Методику виконання вимірювань ударної в'язкості сталей трубопровідного сортаменту» та проведено з використанням зазначеної методики обстеження стану металу труб визначених ділянок переходу аміакопроводу через Тілігульський лиман з метою визначення механічних характеристик (ударна в'язкість, границя плинності).

Розроблено проект Стандарту організацій України «Магістральні нафтопроводи. Лінійна частина. Методи ремонту ділянок нафтопроводів діаметром до 1220 мм».

Матеріали дисертаційної роботи використовуються у навчальному процесі для навчання студентів за спеціальностями «Нафтогазова інженерія та технології» та «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу.

#### **Положення, що виносяться на захист:**

1) метод контролю експлуатаційних параметрів газопровідних систем за комплексом інформаційно-діагностичних критеріїв (наявність та рівень нетехнологічних скупчень в порожнині трубопроводу, теплотворна здатність транспортованого природного газу);

2) закономірності впливу дефектів типу порушення геометрії та наявності наскрізних дефектів малого розміру стінки трубопроводів на режим роботи газопровідних систем та обладнання;

3) закономірність впливу фізико-хімічних характеристик природного газу на енергоефективність та надійність роботи газопроводів;

4) новий метод визначення вищої теплоти згоряння природного газу, що базується на залежності її значення від вмісту діоксиду вуглецю, швидкості поширення ультразвукових коливань в природньому газі та значення його нижчої теплоти згоряння.

**Особистий внесок здобувача.** Основні наукові положення та результати, які становлять суть дисертації, отримані автором самостійно. У роботах, опублікованих у співавторстві, здобувачу належить:

- методологія контролю технічного стану газопровідних систем та обладнання за комплексом діагностичних критеріїв [1, 10, 11, 15, 16, 19, 22, 24, 31, 35, 39, 41, 45, 54, 55];

- спосіб контролю якісних характеристик природного газу, зокрема вищої теплоти згоряння та підвищення точності контролю нижчої теплоти згоряння природного газу, алгоритм роботи вимірювального засобу, спосіб отримання первинних інформативних параметрів [2, 9, 12 – 14, 17, 25, 28, 34, 36, 40, 49, 53, 57, 58];

- методологія визначення втрат пропускної здатності та ефективності роботи газопровідних систем спричинених наявністю нетехнологічних скупчень в порожнинах трубопроводу, дефектів негерметичності та порушення геометрії, якості та фізико-хімічних характеристик природного газу [3 – 6, 8, 18, 20, 21, 23, 26, 29, 30, 32, 33, 37, 38, 42 – 44, 46 – 48, 51, 52];

- шляхи інформаційного та нормативного забезпечення в галузі контролю технічного стану газопровідних систем та обладнання [7, 27, 50, 56].

Зі спільних експериментальних досліджень і публікацій використано, за згодою співавторів, власну частину результатів.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати дисертаційного дослідження доповідались і отримали позитивну оцінку на понад 15 міжнародних і вітчизняних конференціях, зокрема: 6-й, 8-й та 9-й національній науково-технічній конференції і виставці «Неруйнівний контроль та технічна діагностика – UkrNDT», 2009р., 2016р. та 2019р., м. Київ; науково-технічному семінарі «Забезпечення експлуатаційної надійності систем трубопровідного транспорту», 2009р., м. Київ; міжнародній науково-технічній конференції «Нафтогазова енергетика: проблеми та перспективи», 2013р., м. Івано-Франківськ; VIII міжнародному симпозиумі «Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій», 2009р., м. Київ; 15-й, та 17-й міжнародній науково-технічній конференції «Електромагнітні та акустичні методи неруйнівного контролю матеріалів та виробів. Леотест», 2010р. та 2012р., м. Славське Львівської області; 5th International Symposium on Hydrocarbons and Chemistry (ISHC5), 2010, Sidi Fredj, Algeria; міжнародній науково-технічній конференції «Non-Destructive Testing 2011», (3 секційні доповіді), «Non-Destructive Testing 2015», Sozopol, Republic of Bulgaria; 6-й, та 8-й міжнародній науково-технічній конференції і виставці «Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики машинобудівного і нафтогазопромислового обладнання», 2011р. та 2017р., м. Івано-Франківськ; VII международной научно-технической конференции «Надежность и безопасность магистрального трубопроводного транспорта», 2011г., г. Новополоцк, Белоруссия (2 секційні доповіді); міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми і перспективи транспортування нафти і газу», 2012р., м. Івано-Франківськ; Scientific and Technical Union of Mechanical Engineering, year XXIII, 2015; 1-й науково-технічній конференції з міжнародною участю «Неруйнівний контроль в контексті асоційованого членства України в



Європейському Союзу – NDT-UA 2017», 2017 р., Люблін, Польща (2 секційні доповіді); XXII міжнародній конференції «Сучасні методи та засоби неруйнівного контролю і технічної діагностики», 2018р., м. Одеса; 3-ій міжнародній науково-практичній конференції «Прикладні науково-технічні дослідження», 2019р., м. Івано-Франківськ; 5-ій міжнародній науковій конференції «Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах», 2019р., м. Вінниця.

**Публікації.** За темою дисертаційної роботи опубліковано 58 наукових праць, серед них: 26 статей у наукових фахових виданнях України та у періодичних виданнях інших держав (із них 6 у виданнях, що входять до наукометричних баз даних Scopus та WEB of Science); по одному розділу у співавторстві в 3 наукових колективних монографіях, виданих в Європейському Союзі; 2 наукові монографії, видані у співавторстві в Україні; 22 у збірниках праць та тезах міжнародних та вітчизняних конференцій; 5 патентів на винаходи та корисні моделі (в т.ч. 1 закордонний).

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота викладена на 365 сторінках, із них 194 сторінки основного тексту, складається із вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел із 207 позицій, із них 57 латиницею, містить 14 таблиць, 65 рисунків, 59 формул та 10 додатків.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційних досліджень, сформульовано мету та задачі, викладено наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів досліджень, їх апробацію та публікації.

У **першому розділі** виконано дослідження сучасних тенденцій та досягнень в дослідженнях вітчизняних та зарубіжних вчених, науково-дослідних організацій, фірм та компаній у галузі контролю експлуатаційних параметрів трубопровідних систем та обладнання, у тому числі тих, хто займається впровадженням енергоефективних рішень та технологій в газотранспортній галузі, а також рівень методичного, нормативного та технічного забезпечення проведення технічного діагностування.

Проведений аналіз дає можливість стверджувати, що, не зважаючи на достатньо велику кількість наукових публікацій та існуючих на даний час на ринку технічних засобів, рівень розвитку методів та засобів контролю експлуатаційних параметрів та технічного стану газопровідних систем та обладнання характеризується набором недоліків, що може в кінцевому випадку значно знизити достовірність та повноту оцінки технічного стану, а також стати загрозою технологічній безпеці газопровідній галузі. Така загроза є наслідком недостатнього розвитку теоретичних та практичних досліджень всього парку існуючих діагностичних систем та методик, при цьому рішення про технічний стан об'єкта приймається на основі аналізу окремо взятих вимірних параметрів без аналізу їх в комплексі, а нові інформативні параметри до уваги не беруться, оскільки не мають нормативного підґрунтя.

На основі проведеного аналізу було сформовано основні завдання та напрямки дисертаційних досліджень.

**Другий розділ** присвячений розробленню математичних та теоретичних основ контролю технічного стану газопровідних систем за комплексом нових інформативних параметрів з метою обґрунтування можливості їх використання для розроблення нових методів контролю.

*Моделювання впливу малих збурень, які спричинені наскрізними дефектами малих розмірів.* При вирішенні задач технічної діагностики трубопровідних систем дослідники, як правило, мають справу з впливами малих збурень потоків на вказані системи, що призводить до експлуатації об'єктів з порушеннями технологічних режимів. До параметрів, які змінюються мало, але при цьому впливають на ефективність роботи трубопровідних систем, слід віднести малі витоки, зміну характеристик продуктів, що транспортуються, а також зміну геометрії поперечного перерізу трубопроводу (овальність чи зменшення площі внутрішнього перерізу внаслідок наявності нетехнологічних відкладання). Малі витоки мають місце у випадку експлуатації трубопроводів – викривлення осей, дія силових факторів різної природи, які впливають на зміну напружено - деформованого стану аж до виникнення зон, потенційно небезпечних з точки зору виникнення зон можливого порушення суцільності матеріалу, наявність наскрізних дефектів. За цих умов втрата продукту що транспортується є порівняно невеликою (до 0.5 %). Дефекти такого роду можна виявити існуючими технічними засобами, проте дедалі більшого значення набуває використання методів математичного моделювання явищ такого характеру, зокрема, через складність реалізації апаратних засобів, важко доступність поверхонь для реалізації контактних методів дослідження, значний об'єм робіт.

Задача технічного діагностування в даному випадку може бути зведена до задачі моделювання течії з витоками для розроблення методик ідентифікації дефектів, виявлення інформативних параметрів та меж застосування моделей. Слід зазначити, що дослідження стійкості гідродинамічних процесів в зоні малих витоків є важливим з двох аспектів, що впливають на ефективність транспортування: оцінюється величина втрати продукту; вивчається структура течії за наявності малих витоків різної інтенсивності з точки зору виникнення зон турбулентної течії, що може призводити до фактичного зменшення корисного діаметру трубопроводу.

В загальному випадку течія продуктів в трубопроводах може бути описана з використанням системи рівнянь Нав'є – Стокса, записаної в циліндричній системі координат, проте особливості трубопровідних систем з точки зору їх геометрії, симетричності течії, локального характеру зони малих витоків, дозволяє понизити розмірність задачі, а саме вважати, що розглядається двовимірне течія в'язкої рідини в каналі зі стінкою, в якій присутній витік рідини через поверхню, в допущенні, що течія вважається стаціонарною. Це справедливо, зокрема, для квазістаціонарних процесів, коли вважається, що характеристики модельованої течії мало змінюється з часом.

Диференціюючи перше з рівнянь системи рівнянь Нав'є – Стокса по змінній  $x$ , а друге – по змінній  $y$ , та приймаючи до уваги третє рівняння системи рівнянь, отримуємо рівняння Пуасона для визначення тиску:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} = -2 \cdot \rho \left( \frac{\partial v}{\partial x} \cdot \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial u}{\partial x} \cdot \frac{\partial v}{\partial y} \right). \quad (1)$$

де  $U$  і  $V$  – компоненти вектора швидкості в прямокутній декартовій системі координат,  $\rho$  – густина продукту, що транспортується,  $p$  – тиск рідин.

Схема розв'язку системи рівнянь Нав'є – Стокса є наступною: 1) задається деяке початкове наближення тиску; 2) за даним розподілом тиску розв'язується система з граничними умовами; 3) після знаходження компонентів швидкостей обчислюються праві частини рівняння (1); 4) рівняння (1) розв'язується з граничними умовами  $p|_{\partial G} = p_0(x, y)$ ; 5) після одержання нового розподілу тиску вказаний алгоритм повторюється з пункту 1). Вказана процедура повторюється до досягнення збіжності ітераційного процесу.

Початкове наближення розподілу тиску вибиралось з допущенням про те, що існує лінійний перепад тиску по довжині каналу, яким моделюється труба з витоком. Використання цього для розрахунку поля швидкостей дає можливість встановити залежності між інтенсивністю витоків та зміною конфігурації течії.

Аналізуючи поведінку поздовжньої компоненти швидкості в пристіночній зоні, можна стверджувати, що чим більша швидкість витоків, тим швидше відбувається порушення монотонності поля швидкостей на стороні витоків (рис. 1).

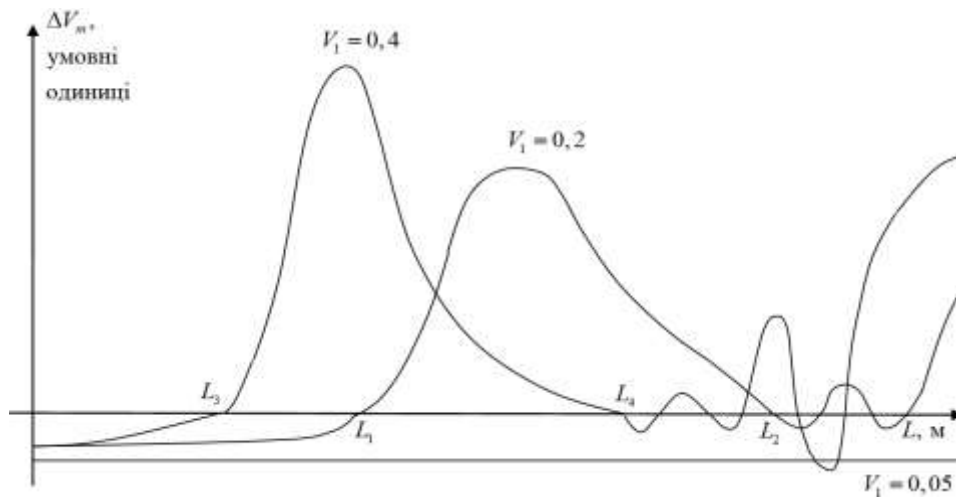


Рис. 1. Залежність між швидкостями у двох точках сітки та відстанню від дефекту при різних модельних значеннях швидкості витоків.

Точки  $L_3$  і  $L_1$  можуть слугувати реакцією течії на мале збурення, вони відповідають мінімальній відстані, на якій дія збурення вже відчутна, а точки  $L_4$  і  $L_2$  – точки втрат стійкості різницевої схеми. В такому випадку точки  $L_3$  і  $L_1$  можуть слугувати діагностичною ознакою, а  $L_4$  і  $L_2$  – ні, причому зміст процесів, що відбуваються після цих точок, може бути наступним – або втрачається стійкість обчислювальної процедури, або ж змінюється фізична картина течії – з

ламінарного вона переходить в турбулентний режим, і для подальшого опису течії необхідно використовувати інші моделі.

На рис. 2 показано, що розроблена модель та чисельна схема її реалізації може бути використана при діагностуванні малих витоків, які розташовані на певній відстані один від одного.

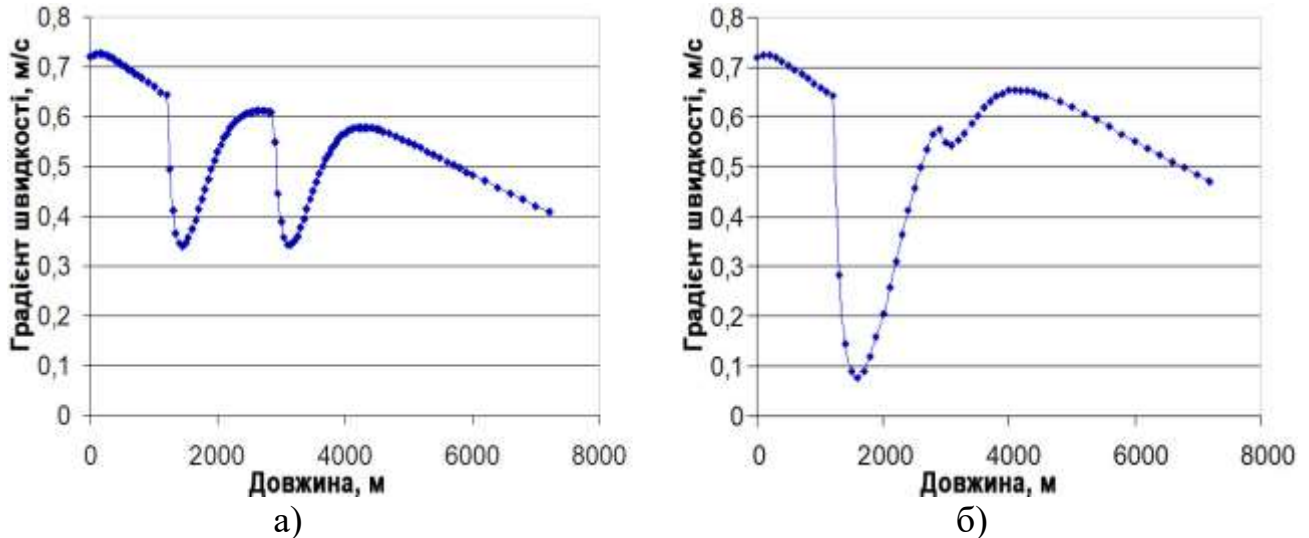


Рис. 2. Залежність між величиною зони впливу малих збурень при наявності кількох витоків різної інтенсивності – координати витоків  $x=1,2$  км та  $x=2,88$  км при швидкості  $0,2$  м/с (а) та  $0,3$  м/с (б).

Одержані результати показують, що значення швидкості залежить від поздовжньої координати, що відповідає реальній технологічній ситуації, величина тиску в трубопроводі і, як наслідок, величина швидкості спадають по довжині труби, що і обумовлює необхідність насосних та компресорних станцій на об'єктах такого роду. Наявність малих витоків впливає на експлуатаційні параметри системи і спричиняє втрату продукту та втрату стійкості течії в трубопроводі, виникнення зон турбулентної течії, внаслідок чого фактично зменшується реальний корисний переріз трубопроводу, а відповідно реальна пропускна здатність.

*Моделювання впливу зміни геометричних характеристик перерізу трубопроводу та властивостей речовини, що транспортується.* В допущенні, що труба має круглий поперечний переріз, а газ рухається під дією сталого перепаду тиску по довжині труби, профіль швидкості визначається за формулою Пуазейля, при цьому слід відмітити, що об'ємна витрата дуже залежить від радіуса труби і є пропорційною четвертій степені радіуса.

При зміні радіуса труби, який може мати місце при відкладенні осадів на внутрішні стінки труби, найбільше реагує об'ємна витрата. Нехай  $a_1$  - проектний радіус трубопроводу,  $a_2$  - радіус після тривалого його експлуатації,  $a_1 > a_2$ ,  $\mu$  - в'язкість газу, тоді в кожній точці  $r = r_1$  перепад швидкості  $\Delta w$  буде рівним:

$$\Delta w = \frac{i}{4\mu} (a_1^2 - a_2^2), \quad (2)$$

при умові незмінності в'язкості рідини. В такому випадку виникає дефіцит в пропускній здатності.

Для компенсації такої недостачі газу, що транспортується, необхідно збільшити відносний перепад тиску, який може бути визначений зі співвідношення:

$$i_1 = \frac{i(R - 4\Delta\delta) \cdot R^3}{(R - \Delta\delta)^4}, \quad (3)$$

де  $\Delta\delta$  - зміна радіусу поперечного перерізу,  $R$  - проектний радіус трубопроводу/

Очевидно, що  $i_1 > i$ , при цьому слід зазначити, що збільшення перепаду тиску зменшує енергоефективність роботи трубопровідної системи. Для усунення даної проблеми необхідно проводити дослідження реального значення товщини відкладень та площі поперечного перерізу.

Іншим важливим моментом є контроль в'язкості речовини, що транспортується. Якщо початковий момент часу динамічна в'язкість газу складає  $\mu$ , а в певний момент часу вона зростає до значення  $\mu_2$ , тоді:

$$\Delta w = \frac{i}{4\mu_1} (a^2 - r^2) - \frac{i}{4\mu_2} (a^2 - r^2) = \frac{i}{4} \cdot \frac{\mu_2 - \mu_1}{\mu_2 \mu_1} (a^2 - r^2). \quad (4)$$

Для компенсації цієї неоднозначності продукту по аналогії з (3) можна отримати необхідне для компенсації недостачі значення деякого перепаду тиску:

$$i_1 = i \frac{\mu_2}{\mu_1}. \quad (5)$$

Загальна формула, яка враховує зміну значення внутрішнього радіуса трубопроводу  $\delta a$ , перепаду тиску  $\delta i$  та зміну динамічної в'язкості  $\delta \mu$  матиме вигляд:

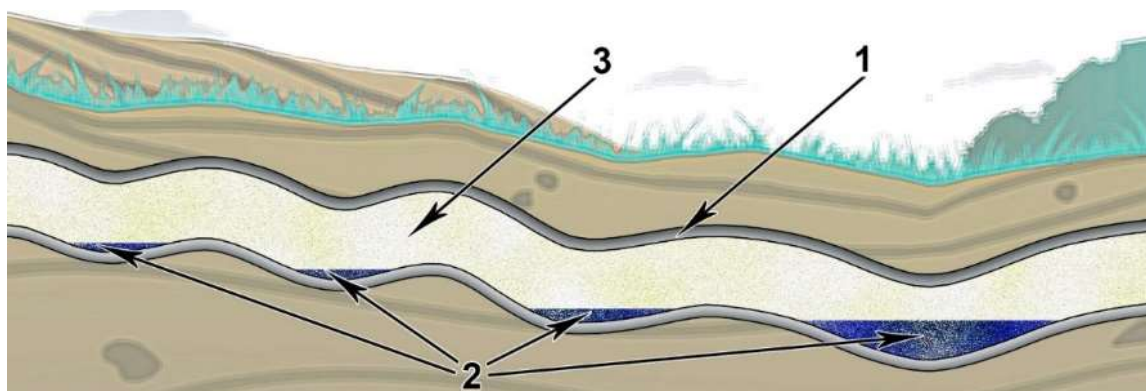
$$\Delta w = \frac{a^2 - r^2}{4\mu} \delta i - \frac{i}{4\mu^2} (a^2 - r^2) \delta \mu + \frac{i}{4\mu} 2a \delta a, \quad (6)$$

а об'ємна витрата газу визначається за формулою:

$$\Delta Q = \frac{\pi a^4}{8\mu} \delta i - \frac{i \pi a^4}{8\mu^2} \delta \mu + \frac{i \pi 4a^3}{8\mu} \delta a. \quad (7)$$

*Моделювання впливу не технологічних скупчень в порожнині трубопроводу.* В процесі експлуатації в порожнині газопроводів виникають різноманітні забруднення у вигляді твердої і рідинної фракції, які, накопичуючись в понижених ділянках траси, зменшують робоче переріз газопроводу, що призводить до зниження його пропускної здатності. При розв'язанні задачі оцінки зміни енергоефективності роботи ділянки газопроводу, спричиненої накопиченням в його порожнині на окремих ділянках нетехнологічних скупчень (рідини) розглянемо наступну схему (рис. 3).

Для ділянки трубопроводу відомими є внутрішній та зовнішній  $R_{kr}^i$  радіуси в кожному із секторів (окремих дрібніших ділянок), в якому виявлена рідина, також, як сказано вище, відомою є максимальна висота рідини  $H_i$ , яка визначена експериментальним шляхом. Кожен із секторів, в якому накопичується рідина, можна зобразити наступним чином (рис. 4).



1- повздовжній профіль газопроводу; 2 - нетехнологічні скупчення (рідина);  
3 – природний газ, що транспортується.

Рис. 3. Схема трубопроводу, в якому накопичується рідина в наслідок конденсації та інших причин

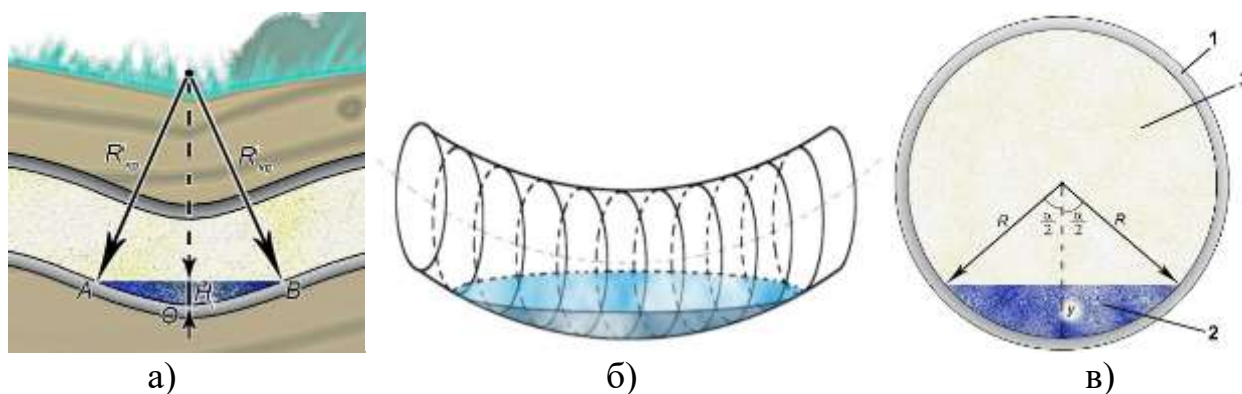


Рис. 4. Схема повздовжнього а), поперечного в) та схематичне зображення заповнення порожнини трубопроводу рідиною б)

Таким чином, об'єм сектора, заповненого рідиною, обчислюється за формулою:

$$\begin{aligned}
 V &= \int_{-L}^L S(x) dx = \\
 &= \int_{-L}^L \frac{1}{2} \arcsin \left[ \frac{R + R_{кр} - H - \sqrt{R_{кр}^2 - x^2}}{R} \right] \cdot R^2 dx - \\
 &- \int_{-L}^L \frac{1}{2} \left( R + R_{кр} - H - \sqrt{R_{кр}^2 - x^2} \right) \cdot \sqrt{R^2 - (R + R_{кр} - H - \sqrt{R_{кр}^2 - x^2})^2} dx
 \end{aligned} \quad (8)$$

Формула (8) дозволяє отримати втрату корисного об'єму трубопроводу внаслідок накопичення рідини. Для оцінки втрати ефективності ділянки трубопроводу можна запропонувати наступну схему: вважаючи, що довжина трубопроводу  $L_0$  залишається сталою, а, за відсутності рідини в трубі, його площа поперечного перерізу складає  $\pi R^2$ , де  $R$  – сталий радіус трубопроводу, об'єм досліджуваної ділянки можна обчислити за формулою  $V_0 = L_0 \cdot \pi R^2$ . Після заповнення деякої частини трубопроводу рідиною, його об'єм, придатний для транспортування продукту, зменшується і складає  $V_H = V_0 - V_{BT}$ , де  $V_{вт} = \sum_{i=1}^N V_i$ .

Вводячи поняття ефективної площі поперечного перерізу  $S_H$ , можна зробити висновок, що вона складає  $S_H = \frac{V_0 - V_{BT}}{L_0} \neq \pi R^2$ . Згідно з цією оцінкою, для забезпечення сталого значення витрати продукту (забезпечення необхідного об'єму перекачування природного газу)  $Q_0$  через трубопровід з рідиною, необхідно затратити додаткову енергію, наприклад, для збільшення швидкості потоку природного газу, що транспортується, на величину, яка може бути визначена за формулою:

$$Q_0 = V_0 \cdot S_0 = V_0 \cdot \pi R^2 = V_1 S_H, \quad (9)$$

Таким чином: зміна поперечного перерізу трубопровідної системи, зміна динамічної в'язкості речовини, що транспортується та питомого перепаду тиску веде до зменшення пропускної здатності трубопровідної системи; аналогічний ефект спостерігається при набутті перерізом трубопровідної системи еліптичної конфігурації; компенсація недоподачі речовини, що транспортується, здійснюється за рахунок підвищення технологічного перепаду тиску; підвищення питомого перепаду тиску обумовлює зменшення енергетичної ефективності системи. Тому заходами, які сприяють підвищенню ефективності трубопровідних систем можуть бути: зменшення в'язкості газів, не допущення відкладення технологічних речовин, контроль за еліптичністю поперечних перерізів трубопроводів.

*Моделювання впливу якості природного газу на ефективність роботи газопроводу.* При проведенні теплотехнічних розрахунків та визначенні витрат природного газу на підприємствах нафтогазового комплексу України (згідно СОУ 60.3-30019801-100:2012) користуються спрощеною методикою за якою густину газу за стандартних умов розраховують за компонентним складом газу (за результатами хроматографічного дослідження), а нижчу об'ємну теплоту згоряння приймають на рівній 34541,1 кДж/м<sup>3</sup>. Тобто методика не враховує зміну теплоти згоряння, а також доступні дані фізико-хімічних параметрів газу, які суттєво впливатимуть на об'єм використаного газу.

Виразимо теплоту згоряння через число Воббе, яке краще описує процес горіння з врахуванням густини газу та повітря (число Воббе, густина газу та відносну густину газу визначаються хімлабораторіями). Тоді удосконалена формула для визначення обсягів витрат технологічного газу вогневим підігрівником матиме вигляд:

$$Q_H^p = \frac{C_p \cdot V \cdot \Delta T \cdot \sqrt{\rho_c \cdot \rho_{сп}}}{\eta \cdot W_H}, \quad (10)$$

де:  $W_H$  – число Воббе нижче,  $\rho_{сп}$  - густина повітря за стандартних умов.

Проведено порівняльний розрахунок на прикладі визначення витрат технологічного газу вогневим підігрівником на газорозподільчій станції за методикою (формулою), яка запропонована в СОУ 60.3-30019801-100:2012 та за удосконаленою формулою. В першому випадку розрахунок проводимо згідно СОУ, в другому випадку за удосконаленою формулою, взявши з протоколів фізико-хімічних показників природного газу значення числа Воббе нижче, реальної густини повітря та газу, в третьому взявши з протоколів фізико-

хімічних показників природного газу значення числа Воббе нижче, реальної густини газу, значення густину повітря відповідно до СОУ 60.3-30019801-100:2012. Результати порівняльного розрахунку подано у вигляді графіків залежності витрат технологічного газу вогневим підігрівником на газорозподільчій станції від значення теплоти згоряння природного газу (рис. 5).

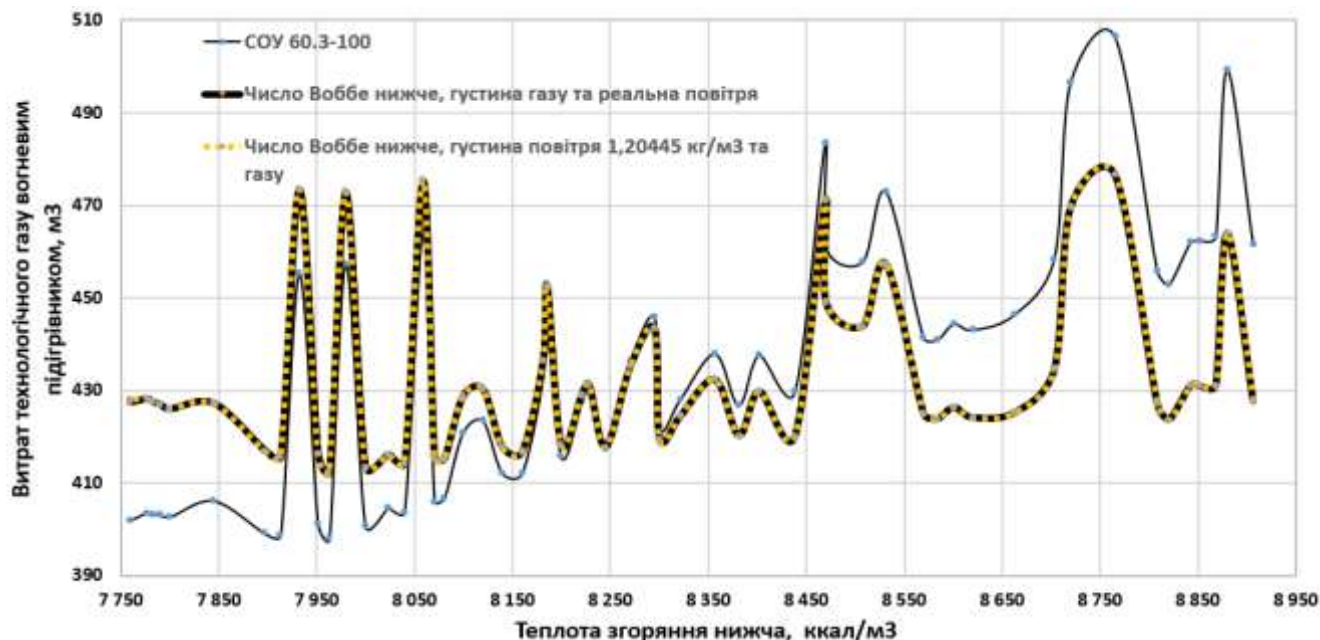


Рис. 5. Витрати технологічного газу вогневим підігрівником від значення теплоти згоряння природного газу

Пропонована удосконалена формула (10) повніше враховує процеси горіння, та доводить необхідність врахування якісних показників природного газу. Реальні значення обсягів газу, які використовуються вогневим підігрівником, будуть меншими, якщо враховувати значення теплоти згоряння природного газу, зокрема для обраної газорозподільчої станції воно менше на 44,1 м³ за добу, або 1234,8 м³ за місяць. Якщо взяти, до прикладу, 161 газорозподільчу станцію, що споживають природний газ для його підігрів за допомогою вогневих підігрівників і які входять тільки до одного центрального регіону ТОВ «Оператор ГТС України», то економія в грошовому еквіваленті за місяць може сягати більше 2 млн. грн.

**Третій розділ** присвячений удосконаленню та розробленню нових методів та методик контролю технічного стану газопровідних систем та обладнання, а також проведенню їх лабораторних випробувань.

*Вимірювання якості природного газу.* Аналіз останніх досліджень в галузі контролю якості природного газу, зокрема його теплотворної здатності, показав, що найбільш перспективними з точки зору вартості та можливості застосування на різних ділянках транспортування газу, від видобування до споживання, є кореляційні методи.

Визначення теплоти згоряння природного газу в Україні регламентується стандартом ДСТУ ISO 15971:2014, в якому визначення теплоти згоряння природного газу здійснюється за трьома методи: прямим, непрямим та



кореляційним. Розроблений метод реалізує комплексний кореляційний підхід до контролю теплоти згоряння природного газу. З метою підвищення точності вимірювань та розширення можливостей методу було проведено моделювання можливості виведення нової кореляційної залежності між значенням вищої теплоти згоряння природного газу та значеннями швидкості поширення ультразвукових коливань і вмістом діоксиду вуглецю в ньому. Вибір тільки цих двох фізико-хімічних параметрів природного газу пов'язаний з технічною реалізацією розробленого методу для контролю нижчої теплоти згоряння.

На основі аналізу протоколів фізико-хімічних показників природного газу, які розміщені у вільному доступі, було створено базу з 1040 наборів даних різних сумішей природного газу.

В базу даних на кожен пробу входять наступні вуглеводневі компоненти в % мол. природного газу: метан; етан; пропан; ізо-бутан; н-бутан; нео-пентан; ізо-пентан; н-пентан; гексани; кисень; азот; діоксид вуглецю. На основі даного компонентного складу природного газу також подано розраховані за ним фізико-хімічні показники, зокрема: густина природного газу; вища та нижча теплота згоряння природного газу; вище та нижче число Воббе.

Діапазон значень: нижчої теплоти згоряння складає від 8907 ккал/м<sup>3</sup> до 7760 ккал/м<sup>3</sup>; вмісту метану від 99,3% до 75,2%; вмісту діоксиду вуглецю від 0% до 4,8%. Дана база буде корисним інструментом при розробці нових методів та методик контролю теплоти згоряння природного газу.

Шляхом проведення регресійного аналізу залежностей між досліджуваними фізико-хімічними властивостями природного газу (швидкістю поширення ультразвукових коливань  $V$  та вмістом діоксиду вуглецю  $X_{CO_2}$  в пробі природного газу) та вищою теплою згоряння природного газу  $Q_B$  з використання методу найменших квадратів, було отримано наступне рівняння:

$$Q_B = 108 + Q_H \cdot \left( 1,052434 + 10^{-4} \cdot V - \frac{\sqrt{6 - X_{CO_2}}}{6500} \right). \quad (11)$$

З використанням встановленої залежності (11) можна проводити розрахунок значення вищої теплоти згоряння природного газу в залежності від значення його нижчої теплоти згоряння, швидкості поширення ультразвукових коливань та вмісту в ньому діоксиду вуглецю.

За результатами проведених моделювань, було побудовано порівняльні графіки зміни нижчої, вищої (за даним протоколів) та вищої розрахованої теплоти згоряння для всього діапазону наборів даних (рис. 6).

Аналіз отриманих результатів проведеного моделювання показує, що максимальне розходження значень вищої теплоти згоряння природного газу за даними протоколів фізико-хімічних показників та значень, отриманих за допомогою отриманої залежності (10) складає не більше  $\pm 4$  ккал/м<sup>3</sup>, а приведена до діапазону 1147 ккал/м<sup>3</sup> похибка вимірювань складає не більше 0,7%.

*Дослідження можливості вимірювання рівня різного роду не технологічних скупчень в порожнині трубопроводу.* Удосконалено метод вимірювання рівня накопичених рідин в порожнині трубопроводу з можливістю визначення кожного їх рівня окремо.

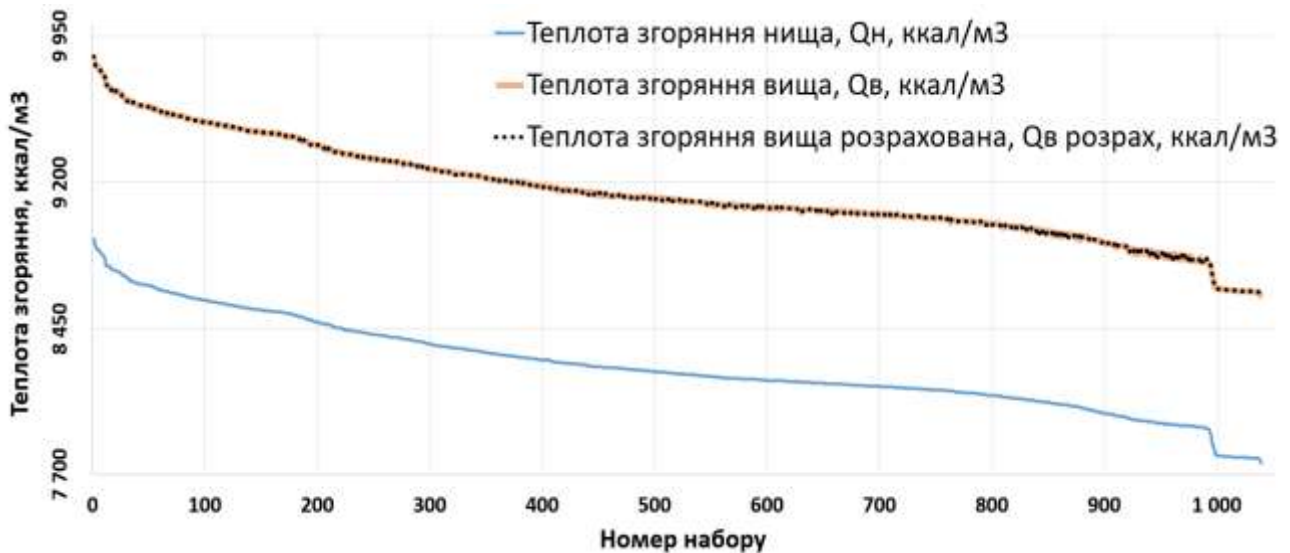
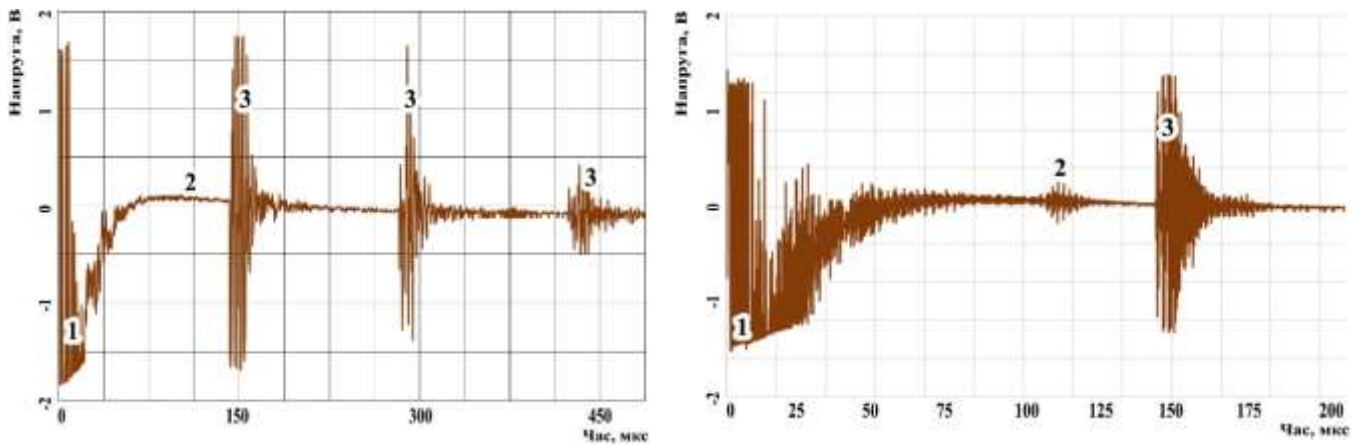


Рис. 6 - Зміни нижчої, вищої (за даним паспортів) та вищої розрахованої теплоти згоряння від номера набору даних



а)

б)

1 – зондуєчий імпульс, 2 – ехо-імпульс відбитий від границі розділу вода-конденсат (у випадку а) не виявляється, маскований шумом), 3 – серія ехо-імпульсів відбитих від границі розділу рідина-газ.

Рис. 7. Осцилограма ехо-сигналів відбитих від границь розділу середовищ до а) та після б) застосування процедури фільтрації.

Метод ґрунтується на акустичному ехо-імпульсному методі вимірювання часу проходження ультразвукових коливань в середовищі. Значною проблемою, що виникає на етапі оброблення результатів вимірювання, є наявність шумів в інформаційному сигналі на границі розділу двох рідких фаз, наприклад вода та газоконденсат через схожість їх акустичних характеристик, що значно ускладнює можливість виявлення границі розділу рідин, оскільки ехо-імпульс від цієї границі маскується шумами.

Додатковою складністю є коливання поверхні рідини під впливом газу, що транспортується, що також ускладнює визначення фактичного рівня рідини. Удосконалення методу полягає у використанні згладжувальних поліноміальних фільтрів Савіцького-Голя з мінімальною квадратичною похибкою (рис. 7).

Удосконалений метод дав можливість зменшити похибку вимірювань, проводити вимірювання рівня різних рідин окремо, а також проводити вимірювання в робочих режимах транспортування газу газопроводами. Відносна похибка при проведенні вимірювання рівня технічної води приведена до діапазону 58,9 мм та складає не більше 4,1 %, а при вимірюванні рівня відпрацьованого моторного мастила привела до діапазону 39,2 мм складає не більше 3,73%.

Дослідження можливості вимірювання рівня витоків природнього газу. Розроблений метод базується на використанні високоточного портативного пристрою обліку швидкості потоку „Hontzsch HFA-Ex”, який призначений для промислових потреб та складається з турбінно-потокowego сенсора та блоку оброблення результатів. Для перевірки розробленого методу, було виготовлено експериментальну вимірювальну ділянку, яка увійшла до складу експериментальної установки. Дослідження було проведено в два етапи з діапазоном витрат від 0,5 м<sup>3</sup>/год до 11 м<sup>3</sup>/год (рис. 8).

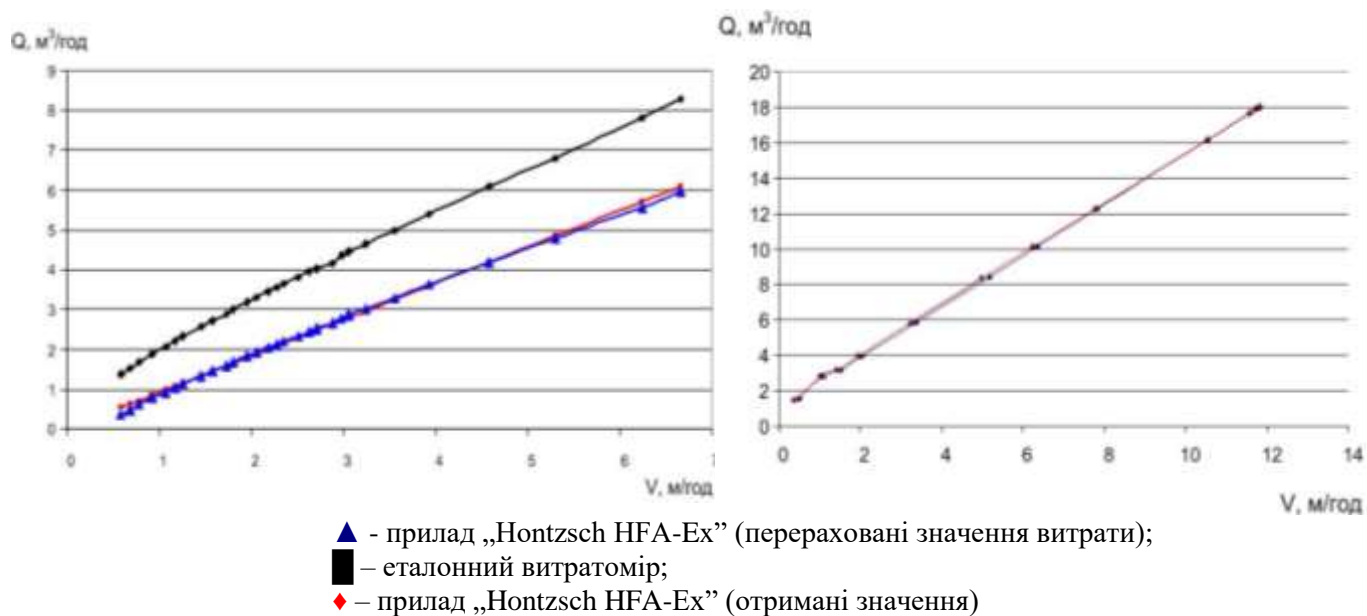


Рис. 8. Графік залежності витрати від швидкості потоку.

Проведені дослідження показали, що спеціальне виконання дозволяє використовувати запропоновану установку для якісного і кількісного контролю стану промислових кранів на предмет наявності в них перетоків та витоків, які виникають через пошкодження ущільнень. Відносна похибка вимірювань не перевищує 1,36 %.

Дослідження методу попередження виникнення дефектів в сталевих трубопроводах. Розроблений метод дозволяє виявляти дефекти в матеріалі трубопроводів на початковому етапі на стадії їх зародження на мікроструктурному рівні та базується на залежностях між структурними шумами (структурними неоднорідностями), які виникають при проведенні ультразвукового контролю (S скан) і змінами в структурі матеріалу труб. Для візуалізації S скану було використано ультразвуковий дефектоскоп, що працює з п'єзоперетворювачами з фазованими ґратками (рис. 9).

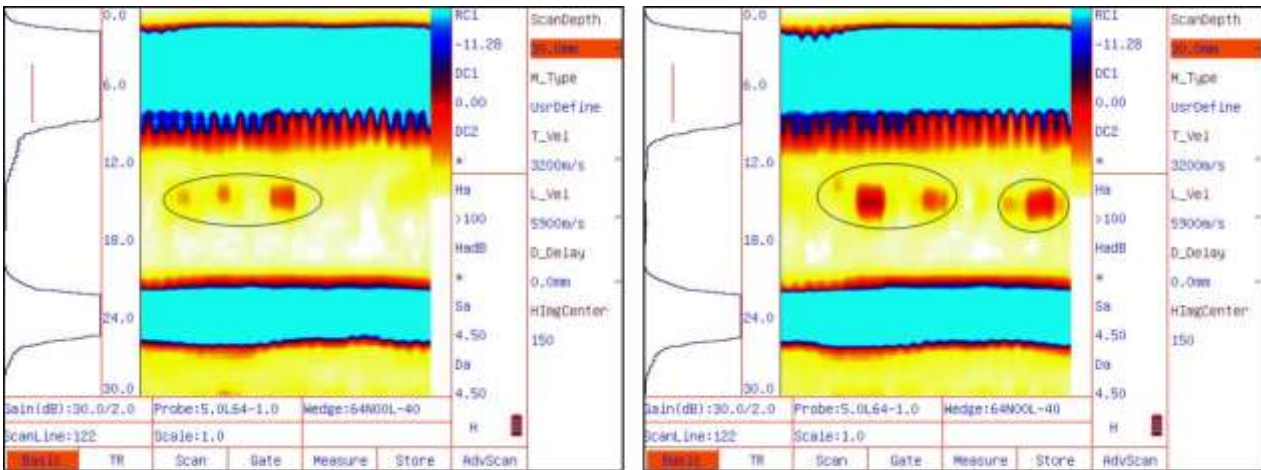


Рис. 9. Акустичне зображення структурних неоднорідностей на екрані дефектоскопа.

Як інформативний параметр було вибрано значення інтегральної густини зображення акустичних структурних шумів, що відображає значення амплітуди (енергії) відбитих від неоднорідностей акустичних коливань. Проведений математичний аналіз, зокрема графічний та кореляційний, показав наявність взаємозв'язку між запропонованим інформативним параметром (інтегральна густина зображення) та границі плинності металу трубопроводу, що дозволяє виявляти окремі ділянки зміни фізико-механічних характеристик та попереджувати виникнення дефектів та руйнувань. Похибка визначення границі плинності за отриманим рівнянням не перевищує 5% у діапазоні значень границі плинності 380...500 МПа.

**Четвертий розділ** присвячений розробленню технічних засобів, що реалізують методи контролю експлуатаційних параметрів технічного стану газопровідних систем.

В ході виконання дисертаційних досліджень автором спільно з колективом кафедри енергетичного менеджменту та технічної діагностики ІФНТУНГ розроблено декілька унікальних технічних засобів та технологій, що реалізують розглянуті у попередніх розділах методи.

*Прилад для контролю теплоти згоряння природного газу.* В ході дисертаційних досліджень було суттєво удосконалено технологію, підвищено точність, розширено діапазон та параметри вимірювання, виготовлено та підготовлено до технічних випробувань прилад для визначення теплоти згоряння газу природного GAS–HI–Q.

Зокрема, за допомогою приладу можна проводити вимірювання не тільки значення нижчої, але і вищої теплоти згоряння природного газу (описано в розділі 3). Виведена та введена в алгоритм вимірювань залежність компенсації температури проби природного дозволяє проводити вимірювання в побутових та промислових умовах, а запропонована методика опрацювання інформативних сигналів дозволила підвищити точність вимірювання.

Методика опрацювання інформативних сигналів базується на ряді схематичних рішень, які зменшують вплив похибки втрати півхвилі при ультразвукових вимірюваннях (рис. 10), що реалізується за допомогою блоку

інверсії, сумування та інтегрування ехо-сигналу, а також на розробленому алгоритмі пошуку точки відліку акустичного сигналу.

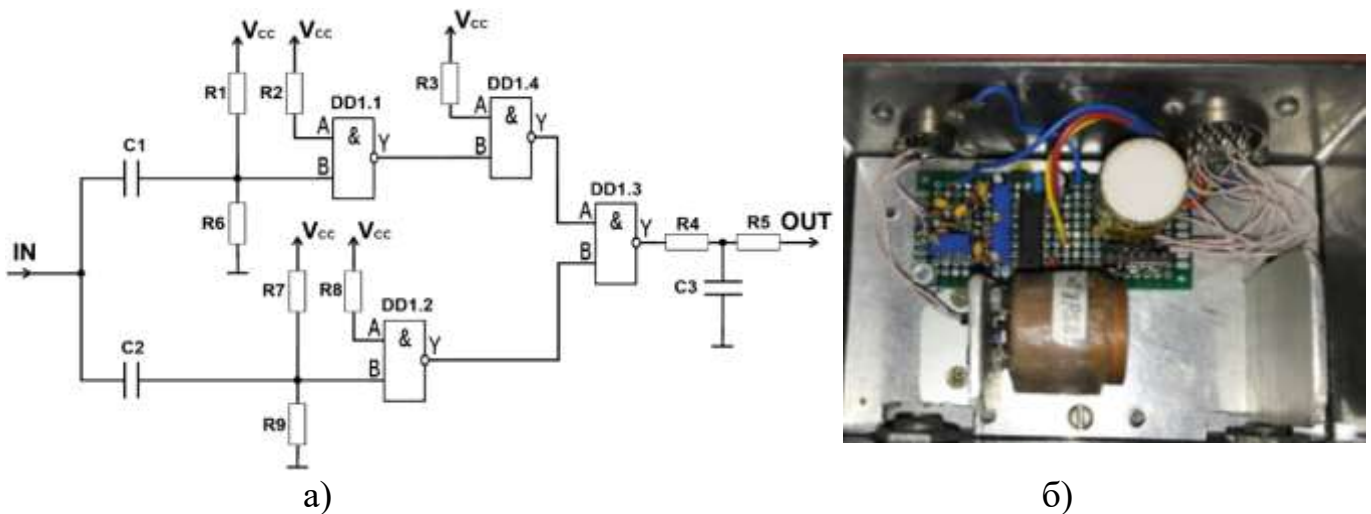


Рис. 10. Функціональна схема блоку інверсії, сумування та інтегрування ехо-сигналу а) та виготовлений блок підсилення та інверсії б).

Суть схемотехнічних рішень полягає в удосконаленні блоку підсилення та формування ехо-імпульсу шляхом врахування при обробці як додатних так і від'ємних значень синусоподібного ехо-імпульсу, розробленні алгоритму змінного в часі коефіцієнту підсилення ультразвукових коливань, що пройшли крізь досліджувану пробу природнього газу, а також алгоритму пошуку максимуму амплітуди синусоподібного ехо-імпульсу. Додатково удосконалено генераторний блок приладу, шляхом розробки схемотехнічних рішень, які забезпечили його роботу в імпульсному режимі та тільки на момент проведення вимірювання, що значно скоротило енергоспоживання приладу та забезпечило можливість його довготривалої автономної роботи від акумуляторних батарей.

*Система для виявлення та вимірювання рівня рідини в порожнинах газопроводів.* Виготовлена система складається з контрольних постів, які встановлюються в місцях з найбільш ймовірним накопиченням рідини в газопроводі, блоку узгодження та портативного пристрою контролю, в якості якого може слугувати звичайний ультразвуковий дефектоскоп. Вимірювання здійснюється почергово шляхом підключення пристрою контролю до кожного контрольного поста (рис. 11).



Рис. 11. Налагодження, монтаж та апробація експериментальної системи.

Монтаж та апробація (яка триває вже більше 10 років) дослідного взірця системи для вимірювання рівня рідини в порожнині газопроводу проводилась на Навчально-науковому полігоні кафедри Енергетичного менеджменту та технічної діагностики. Наявність рідини чітко визначалася, при цьому похибка вимірювань не перевищує  $\pm 0,1$  мм.

*Установка для контролю витоків на кранових вузлах та обладнанні.* Установка для контролю витоків складається з обчислювального пристрою, турбінно-потокowego сенсора, який через втулку з'єднаний з вимірювальними ділянками, діаметром  $d$  та довжиною  $18d$  (для запобігання утворення турбулентного потоку). Вимірювальна ділянка під'єднується безпосередньо до імпульсних трубок на кранових вузлах через гнучкі шланги. Для забезпечення широкого діапазону вимірювань було виготовлено вимірювальні ділянки діаметрами 18 мм і 40 мм.

**П'ятий розділ** присвячений промисловим дослідженням нових методів та методик контролю технічного стану трубопровідних систем та обладнання.

Виготовлення та промислова апробація *приладу для контролю теплоти згорання природного газу GAS-Hi-Q*, було проведено на базі Богородчанського ЛВУМГ УМГ «ПРИКАРПАТТРАНСГАЗ» в ході виконання науково-дослідних та досвідно конструкторських робіт в рамках договору між ПАТ "УКРТРАНСГАЗ" та ІФНТУНГ. Випробування проводились у три етапи. Впродовж першого етапу, вимірювання проводились на попередньо відібраних пробах газу представниками лабораторії, з зазначеними значеннями ТЗПГ проби, визначеними з використанням хроматографа Кристал-2000. Впродовж другого етапу відбиралась проба з мережі ГРС Богородчани. Третій етап проходив на ГРС Угринів (рис. 12).



Рис. 12. Відбір проби на ГРС Угринів та використання потокового хроматографа Danaluxer 370 ХА.

Значення теплоти згорання проби, відібраною з ГРС Угринів, визначалось в процесі вимірювання приладом і поточним хроматографом Danaluxer 370 ХА. Результати вимірювань підтвердили необхідну точність вимірювання приладу.

Промислова апробація *установки для контролю витоків на кранових вузлах та обладнанні.* В процесі експлуатації часто відбуваються різні порушення нормального функціонування окремих вузлів, зокрема запірної та регулюючої арматури. Також негерметичність запірної арматури та

байпасування призводить до зниження ефективності компресорних станцій та перевитрати технологічного газу. Перевитрата паливного газу в 10 %, яка виникає внаслідок негерметичності на кранових вузлах та байпасування, це надлишкове спалювання 2,2 млрд. м<sup>3</sup> паливного газу в рік, і це тільки по одній компресорній станції. З метою виявлення негерметичності на кранових вузлах та проведення промислової апробації розробленої установки для контролю витоків було проведено її промислові випробування в умовах ДК «Укртрансгаз», Бібрське ЛВУМГ (табл. 1).

Табл. 1 – Результати випробувань в умовах ДК «Укртрансгаз»

Об'єкт/ділянка вимірювання	Швидкість витоку, м/с	Витрата, м <sup>3</sup> /год
Кран №35 (імпульсні трубки)	0,81	0,86
Кран №17 (імпульсні трубки)	1,3	1,22
Свічка камери запуску поршня №3	2,51	2,23
Кран № 21 (імпульсна трубка)	Витоку не виявлено.	
Муфта для підключення манометра (на крані №17)	0,57	0,49
Свічка камери запуску поршня №4	Витоку не виявлено.	

В ході проведення випробувань були виявлені місця витоків природного газу на кранових вузлах магістральних трубопроводів та запірно-регулюючій арматурі, а також виміряно їх об'єм. Багаторічний досвід експлуатації об'єктів газового господарства показує, що найбільш великі аварії з важкими наслідками виникають через несвоєчасне виявлення та усунення витоків газу.

Промислова апробація *установки для контролю витоків на кранових вузлах та обладнанні* в умовах АГНКС. Дослідження технологічних і нетехнологічних витоків природного газу при експлуатації АГНКС включає в себе основні види і



Рис. 13. Виявлення нетехнологічного витоку природного газу на елементах обладнання АГНКС: а) дренаж замірного вузла; б) індикаторний пристрій одоризації газу.

стадії роботи: пошук витоків природного газу з обладнання, визначення загазованості закритих приміщень; визначення об'єму витоків газу з негерметичного обладнання АГНКС (рис. 13).

В ході апробації було проведено такі роботи: дослідження технологічних і нетехнологічних втрат природного газу при експлуатації; вимірювання втрат природного газу при експлуатації; вимірювання втрат природного газу при щодобовому обслуговуванні; вимірювання втрати газу при дренажу фільтрів газозаправної колонки; вимірювання втрати газу при дренажу компресорної установки; вимірювання втрати газу при дренажу вхідних фільтрів-сепараторів компресорної установки; вимірювання втрат природного газу при щодобовому обслуговуванні ГРС; визначення об'єм втрат газу при аварійному скиді.

При проведенні вимірювань були виявлені наступні витрати та технологічні втрати газу: на продувній свічці №1, які складають 1,8 м<sup>3</sup> на добу; на дренажному патрубку замірного пункту, які складають 0,5 м<sup>3</sup> на добу; при дренажу фільтрів газозаправної колонки 12,5 м<sup>3</sup> на операцію; при дренажу компресорної установки 10,5 м<sup>3</sup> на операцію; при дренажу вхідних фільтрів-сепараторів 3,1 м<sup>3</sup> на операцію; при щодобовому обслуговуванні 13,62 м<sup>3</sup> на добу; при аварійному скиді 744,4 м<sup>3</sup> за операцію; при проведенні технічного обслуговування та ремонту 1039,928 м<sup>3</sup>.

За результатами проведених вимірювань, та на основі розробленої методики, проведено визначення втрат природного газу на АГНКС, а також розроблено відповідні форми актів втрат природного газу при проведенні робіт з щоденного обслуговування, технічного обслуговування (ремонт) та втрат при виникненні аварійних ситуаціях.

Промислова апробація системи для виявлення та вимірювання рівня рідини в порожнинах газопроводів проводились на ділянці газопроводу «Пасічна-Промисел-Тисмениця» діаметром 325 мм та 525мм Богородчанського ЛВУМГ та на газопроводі «Долина-Ужгород-Держкордон» (800мм) та Компресорній станції «Росош» Закарпатського ЛВУМГ з метою пошуку та вимірювання рівня води (конденсату) в порожнинах газопроводу (Табл. 2).

В ходів випробування практично на всіх відкритих ділянках газопроводів було виявлено накопичення рідини, який складав від 35мм до 205 мм, що є потенційно небезпечним, оскільки рівень води займає більше 40% внутрішнього січення трубопроводу.

Табл. 2 – Результати промислової апробації.

№	Об'єкт	Рівень рідини, мм
1	Газопровід «Пасічна-Промисел-Тисмениця», діаметром 525 мм	205
2		160
3		35
4		20
5	Газопровід «Пасічна-Промисел-Тисмениця», діаметром 325 мм	15
6		8
7		34
8	Газопровід «Долина-Ужгород-Держкордон», діаметром 800 мм	28
9		21

*Досвід проведення робіт з визначення фізико-механічних характеристик та виявлення дефектів в сталевих трубопроводах.* Роботи було проведено в два етапи на потенційно небезпечних ділянках магістрального газопроводу «Союз» на переході р. Айдар (1239 км, Луганська обл.) та на магістральному трубопроводі рідкого аміаку на ділянці № 15 (Одеська обл.). Згідно з календарним планом робіт за відповідними договорами було проведено: візуально-інструментальний та оптичний контроль стану трубопроводу опор та місць входу в землю; вимірювання товщини стінки трубопроводу; вимірювання твердості; вимірювання ударної в'язкості; вимірювання коерцитивної сили; вимірювання рівня рідини в порожнинах газопроводу.



Дослідження було проведено згідно з розробленою методикою випробувань з використанням розроблених технічних засобів та приладів, які виготовляються серійно. За результатами проведених досліджень на магістральному газопроводі було виявлено ділянки з аномально великим розкидом значення границі плинності металу труби (рис. 14), що може свідчити про деградацію механічних властивостей матеріалу.

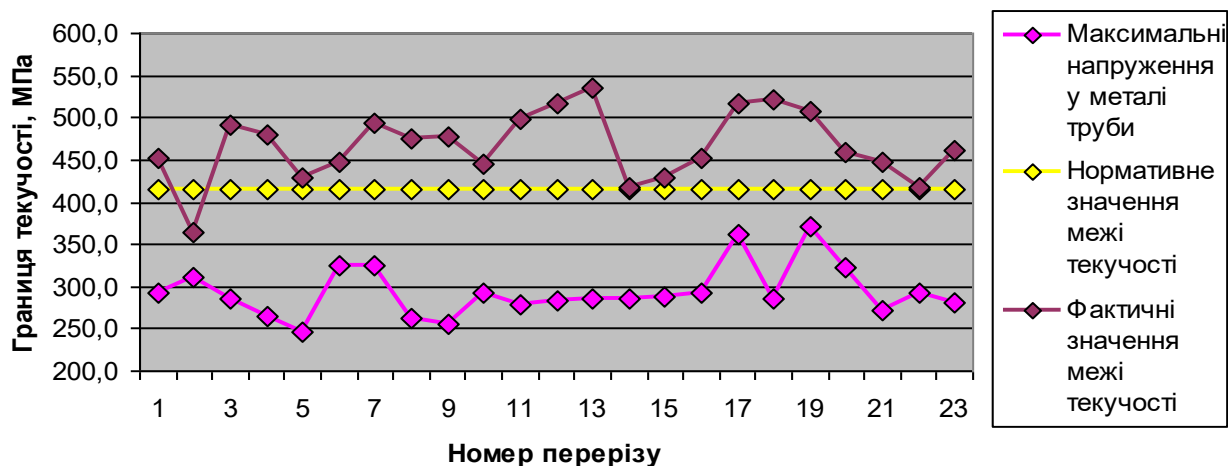


Рис. 14. Розподіл значень межі текучості та напружень на обстеженій ділянці газопроводу.

Дослідження проведені на магістральному трубопроводі рідкого аміаку та проведені розрахунки навпаки не виявили процесів деградації фізико-механічних характеристик металу, що дозволило не проводити роботи з ремонту даної ділянки.

*Досвід проведення робіт з контролю експлуатаційних параметрів та енергоефективності газопровідних систем промислових підприємств.* Відповідно до угоди між ПАТ «УКРТРАНСГАЗ та ІФНТУНГ в 2016р. – 2017р. було проведено роботи з енергоаудиту, моніторингу та аналізу енергоспоживання, визначення показників енергоефективності, розробка пропозицій щодо енергозбереження для об'єктів ПАТ «УКРТРАНСГАЗ» (рис. 15).

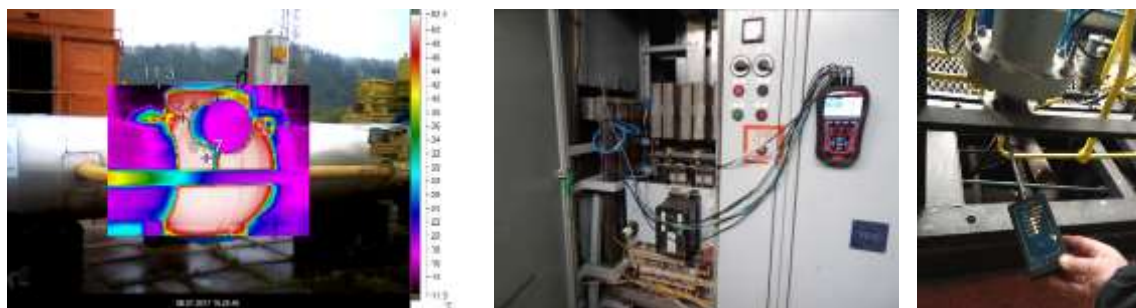


Рис. 15. Проведення обстеження газопровідних систем та обладнання промислових підприємств.

Метою науково-технічної роботи було визначення та аналіз показників енергоефективності лінійної частини магістральних газопроводів, компресорних станцій, цехів, газорозподільчих та газовимірювальних станцій та технологічних

процесів, складання енергетичних балансів за всіма видами енергетичних ресурсів, а також проведення інструментального контролю за ефективністю витрат паливно-енергетичних ресурсів на об'єктах Долинського ЛВУМГ.

За результатами виконання робіт було здійснено розробка організаційно-технічних заходів щодо підвищення ефективності використання паливно-енергетичних ресурсів, визначення переліку робіт, необхідних для реалізації конкретних енергозберігаючих заходів, проведена кількісна оцінка факторів, що впливають на економічну ефективність заходів, виконана оцінка вартості запропонованих заходів і їх ранжування по енергетичній ефективності.

**Шостий розділ** розкриває проблеми та перспективи розвитку нормативного забезпечення розроблених технічних засобів та методів діагностики трубопровідних систем та обладнання, а також визначення енергетичної ефективності їх роботи. Без розробки відповідного нормативного забезпечення не можливе використання нових технічних засобів та технологій.

*Розроблення нормативного забезпечення вимірювання теплоти згоряння природного газу кореляційним методом.* Розроблення даного нормативного документу (СОУ 49.5-30019801-137:2017) стало наслідком успішного виконання науково-дослідної роботи, проведення промислового випробування та передачі приладу для вимірювання теплоти згоряння природного газу в ПАТ «УКРТРАНСГАЗ». Розроблений стандарт установлює методику вимірювання об'ємної теплоти згоряння природного газу кореляційним методом, який не вимагає вимірювання складу газу, або обчислень, що ґрунтуються на складі газу для використання у вимірювальних хіміко-аналітичних лабораторіях, діагностичних лабораторіях і підрозділах метрологічної служби ПАТ «УКРТРАНСГАЗ», що контролюють і використовують у своїй виробничій діяльності фізико-хімічні показники якості газу. Робочий діапазон для нижчої теплоти згоряння міститься між 31,81 МДж/м<sup>3</sup> (7600 ккал/м<sup>3</sup>) і 37,68 МДж/м<sup>3</sup> (9000 ккал/м<sup>3</sup>) за стандартних умов. Стандарт прийнято та надано йому чинності наказом ПАТ "УКРТРАНСГАЗ" від 28.12.2017 № 906.

*Розроблення методичного забезпечення з оцінки втрат і витрат енергоносіїв при їх транспортуванні та зберіганні.* В ході виконання науково-дослідної роботи з розроблення та впровадження енергоефективних технологій на діючих енергоємних об'єктах нафтогазового комплексу була розроблена методика з оцінки втрат енергоносіїв при зберіганні та транспортуванні. Дана методика призначена для визначення питомих виробничо-технічних витрат природного газу під час експлуатації компресорних станцій магістральних газопроводів, дожимних компресорних станцій підземних сховищ газу, які обладнані різними типами газоперекачувальних агрегатів, лінійної частини магістральних газопроводів, підземних сховищ газу з метою визначення рівня найбільш раціонального використання та економного споживання газу, відповідно з структурою його витрат, на цих об'єктах на рівні газотранспортних підприємств (Управління МГ та ін. організаційних структур).

*Розроблення методичного забезпечення з визначення об'ємів витоків природного газу.* На замовлення ПАТ «КОНЦЕРН ГАЛНАФТОГАЗ» в 2016 р. були проведені науково-дослідні роботи з вимірювання об'ємів та розроблення

методики визначення витоків природного газу на АГНКС ПАТ «КОНЦЕРН ГАЛНАФТОГАЗ». Розроблена методика поширюється на роботи: по експериментальному визначенню наявності витоків газу з обладнання, встановленого на комунікаціях і об'єктах газорозподільчих станцій; по вимірюванню та розрахунку об'ємів виявлених витоків газу; по визначенню загазованості приміщень. За результатами виконання науково-дослідних робіт дана методика була передана замовнику на затвердження.

*Розроблення технічних умов на виготовлення системи моніторингу накопичень рідини в порожнині трубопроводу.* Розроблені технічні умови ТУ У 26.5-02070855-001:2016 погоджено з ДП «Карпатський експертно-технічний центр», управлінням Держпраці в Івано-Франківській області та мають висновок державної санітарно-епідеміологічної експертизи.

*Розроблення методичного забезпечення для ремонту нафтопроводів.* Надійна та безаварійна експлуатація будь-яких трубопровідних систем не можлива без вчасно та якісно проведених ремонтних робіт з використанням сучасного обладнання та технологій. За результатами робіт було розроблено методику, яка встановлює основні вимоги до методів і технологій виконання робіт при ремонті ділянок трубопроводів лінійної частини магістральних нафтопроводів діаметром до 1220 мм включно з надлишковим тиском до 10 МПа із заміною ізоляційного покриття без зміни та зі зміною планово-висотного положення трубопроводу, із заміною ділянок трубопроводів, при ремонті тіла труби, у гірських умовах і на заболоченій місцевості, у т.ч. з використанням комплексу машин підвищеної продуктивності; порядок підготовки до виконання ремонту трубопроводів, а також контролю якості та прийняття ремонтних робіт. Дану методику було погоджено з філією «Придніпровські магістральні нафтопроводи» ПАТ «Укртрансфата» та подано на затвердження.

*Розроблення методик для визначення фізико-механічних характеристик сталей.* Розроблення нових методів та технологій контролю, в тому числі і фізико-механічних характеристик, завжди вимагає створення принципово нових нормативних документів, що встановлюють порядок застосування розроблених технологій та приладів.

В ході виконання робіт за договором з УДП «Укрхімтрансміак» було розроблено дві методики: Методика виконання вимірювань ударної в'язкості сталей трубопровідного транспорту; Методика виконання вимірювань границі плинності конструкційний (трубопровідних) сталей. Згадані методики погоджені з ДП «Івано-Франківськстандартметрологія», ННЦ «Інститут метрології» (м. Харків), Карпатським експертно-технічним центром та ТОВ «НВФ «Зонд»

*Створення банку даних фізико-хімічних характеристик природного газу.* В ході проведення дисертаційних досліджень було створено базу даних про компонентний склад та фізико-хімічні показники сумішей природного газу. База містить 1040 наборів даних різних газів. Діапазон значень: нижчої теплоти згоряння складає від 8907 ккал/м<sup>3</sup> до 7760 ккал/м<sup>3</sup>; вмісту метану від 99,3% до 75,2%; вмісту діоксиду вуглецю від 0% до 4,8%. Дана база буде корисним інструментом при розробці нових методів та методик контролю теплоти згоряння природного газу.

## ВИСНОВКИ

У дисертації подано теоретичне узагальнення та нові рішення актуальної науково-практичної проблеми в галузі методів та приладів контролю експлуатаційних параметрів газопровідних систем, що полягає в розробленні новітніх методів контролю експлуатаційних параметрів шляхом дослідження нових інформативних параметрів контролю як технічного стану так і режиму роботи газопровідних систем. Отримано наступні основні результати і сформульовано такі наукові положення:

1. Проведений аналіз сучасного стану та тенденцій розвитку методів, засобів та технологій неруйнівного контролю експлуатаційних параметрів газопровідних систем та обладнання показав, що визначення технічного стану та їх діагностика здійснюється в основному за окремими інформативними параметрами без комплексного їх врахування, а висновок про можливість подальшої експлуатації обладнання приймається на основі тільки результатів контролю технічного стану матеріалу трубопроводів.

2. Розроблено теоретичні основи та математичну залежність впливу невеликого розміру наскрізних дефектів стінок трубопроводів на процес транспортування газу. Доведено, що наявність таких дефектів не тільки створює небезпечні аварійні ситуації з руйнуванням трубопроводів та завдання шкоди навколишньому середовищу, але і впливає на ефективність роботи трубопроводних систем та обладнання, створюючи локальний опір потоку та зменшуючи пропускну здатність та енергоефективність трубопроводних систем.

3. Розроблено математичні моделі впливу зміни геометрії поперечного перерізу (еліптичність, гофри, вдавлювання) газопроводу, наявності нетехнологічних скупчень в порожнині трубопроводу та якісних (фізико-хімічних) показників природного газу на пропускну здатність трубопроводних систем, що дає можливість оцінити вплив згаданих змін на енергоефективність роботи газопроводів та обладнання. Оцінений економічний ефект від впровадження заходу з врахування фізико-хімічних показників природного газу при експлуатації обладнання всіх газорозподільчих станцій центрального регіону складає більше 2 млн. грн. на місяць.

4. В ході теоретичних та експериментальних досліджень виконано удосконалення методів:

- контролю теплоти згоряння природного газу, що полягає в розширенні можливості, зокрема збільшення діапазону вимірювань на 10%, підвищення на 3% точності вимірювань шляхом використання ряду сфокусованих рішень, які зменшують вплив похибки втрати півхвилі при ультразвукових вимірюваннях та розробленого алгоритму пошуку точки відліку акустичного сигналу, а також можливість вимірювання не тільки нижчої, але і вищої теплоти згоряння природного газу на основі отриманої залежності вищої теплоти згоряння від вмісту діоксиду вуглець, швидкості поширення ультразвукових коливань в пробі природного газу та значення нижчої теплоти згоряння;

- вимірювання рівня скупчень в порожнині трубопроводу, що дозволило зменшити на 2% похибку вимірювань та проводити вимірювання рівня різних рідин окремо в робочих режимах транспортування газу газопроводами.

5. Розроблено та експериментально досліджено новий метод контролю наявності та вимірювання об'єму витоків природного газу на кранових вузлах та обладнання магістральних трубопроводів, що дозволяє оцінювати виток з похибкою не більше 1,36%. Даний метод пройшов успішні промислові випробування та показав свою ефективність при виявленні як мікро, так і дуже великих, перед аварійних витоків.

6. Проведено експериментальні дослідження нового інформативного параметру, а саме значення інтегральної густини зображень акустичних структурних шумів, які отримуються за допомогою ультразвукового дефектоскопа, що працює з п'єзоперетворювачами з фазованими ґратками, що дозволило розробити новий метод попередження виникнення дефектів в сталевих трубопроводах на стадії їх зародження на мікроструктурному рівні та визначення границі плинності металу трубопроводу.

7. Розроблено та впроваджено нові технічні засоби (пристрій для вимірювання вищої теплоти згоряння природного газу, установка для вимірювання рівнів рідин в порожнині газопроводу, установка для вимірювання рівнів витоків природного газу з газопроводів та обладнання) та технології які реалізують можливість контролю експлуатаційних параметрів газопровідних систем та обладнання та здійснено їх промислові випробування. Також розроблено ряд нормативних документів різних категорій (методик проведення вимірювань, методичного забезпечення з визначення об'ємів витоків природного газу, технічні умови на виготовлення розроблених систем) та введено в дію стандарт (СОУ 49.5-30019801-137:2017), який регламентує вимірювання теплоти згоряння природного газу кореляційним методом.

## ОСНОВНІ ПУБЛІКАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

**Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:**

1. Карпаш М. О. Акустичний контроль конструкцій та устаткування у нафтогазовій галузі : монографія / М. О. Карпаш, І. В. Рибіцький, Т. Т. Котурбаш, О. Г. Бондаренко, О.М. Карпаш ; Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2011. 420 с.

2. Природний газ: інноваційні рішення для сталого розвитку : монографія / загальна редакція: О. Карпаш. Редакційна колегія: Райтер П.М., Карпаш М.О., Яворський А.В., Тацакович Н.Л., Рибіцький І.В., Дарвай І.Я., Банахевич Р.Ю., Височанський І.І. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2014. 398с.

3. Rybitsky I., Slobodyan M., Kogut G., Popovych V., Karpash M. Analysis of measures to enhance energy efficiency and sustainable development of the gas transmission system of Ukraine. *New Trends in Production Engineering. Monograph, Part 2. Warsawa. 2019, pp.76-84. <https://doi.org/10.2478/ntpe-2019-0046>.*

4. Doroshenko Ya.V., Karpash O.M., Rybitskyi I.V. Investigation of dispersed contaminants influence on the hydraulic energy consumption of elements of gas

pipeline systems with complex geometry. *Topical scientific researcher into resource-saving technologies of mineral mining and processing. Multi-authored monograph.* Sofia:Publishing House “St. Ivan Rilski”, 2020. P.182–207. ISBN978-954-353-408-1.

5. Raiter P. Methods and system for non-separational evaluation of hydrocarbon flow composition. *Modernization and engineering development of resource-saving technologies in mineral mining and processing : Multi-authored monograph / Raiter P., Karpash O., Yavorskyi A., Rybitskyi I. ; Petrosani, Romania. UNIVERSITAS Publishing. 2019. 476p. pp. 304–326.*

6. Карпаш О. М., Слободян В. І., Опацький В. І., Яворський А. В., Рибіцький І. В. Система для оцінки рівня рідини в діючих газопроводах. *Нафтова і газова промисловість.* 2009. №5–6. С. 41 – 43. **(Фахове видання).**

7. Карпаш О. М., Карпаш М. О., Рибіцький І. В., Тацакович Н. Л.. Розвиток засобів неруйнівного контролю і технічної діагностики в нафтогазовій галузі. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль.* 2009. № 3. С. 35-41. **(Фахове видання).**

8. Яворський А. В., Карпаш О.М., Рибіцький І. В. Підходи до виявлення витоків газу з лінійної частини магістральних газопроводів у зонах геодинамічного ризику. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ.* 2011. №1(38). С. 113 – 119. **(Фахове видання).**

9. Rybitskyi I., Karpash O., Darvay I., Karpash M. New low-cost method for determination of heating value of natural gas. *Wiertnictwo. Nafta. Gaz.* Vol. 28, Issue 1-2. Krakow, 2011, p.333-338.

10. Миндюк В. Д., Карпаш М. О., Яворський А. В., Рибіцький І. В., Доценко Є. Р. Досвід оцінки деградації матеріалу труб аміакопроводу за результатами неруйнівного контролю їх механічних характеристик. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль.* 2012. №2. С. 30-35. **(Фахове видання).**

11. Котурбаш Т. Т., Карпаш М. О., Рибіцький І. В. Експериментальна перевірка безконтактного ультразвукового методу контролю товщини стінки газопроводів у процесі внутрішньотрубної діагностики. *Методи та прилади контролю якості.* 2012. №28. С.26-32. **(Фахове видання).**

12. Koturbash T., Karpash M., Darvai I., Rybitskyi I., Kutcherjv V. Development of new instant technology of natural gas quality determination. *Proceedings of the ASME 2013 Power Conference : Power 2013.* July 29-August 1, Boston, Massachusetts, USA, 2013. pp. 1-6. **(Scopus).**

13. Дарвай И. Я., Карпаш М. О., Рыбицкий И. В. Контроль качества природного газа - новое решение. *Литье и металлургия,* 3(67), 2012. с. 328-334.

14. Рибіцький І. В., Височанський І. І., Карпаш О. М., Карпаш М. О. Урахування температури природного газу при експрес-визначенні його теплоти згоряння. *Нафтогазова енергетика.* 2017. №2(28). С. 83-88. **(Фахове видання).**

15. Олійник А. П., Незамай Б. С., Рибіцький І. В. Математичне моделювання впливу силових факторів на характеристики трубопроводу в процесі експлуатації. *Методи та прилади контролю якості.* 2018. №1(40). С. 105-107. **(Фахове видання).**

16. Чабан Н. І., Рибіцький І. В., Миндюк В. Д. Розвиток акустичного виду контролю для виявлення та оцінювання структурних змін сталевих конструкцій. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. м. Івано-Франківськ, 2018. №3(68). С. 27-30. **(Фахове видання)**.

17. Рибіцький І. В., Карпаш М. О., Яворський А. В., Райтер П. М., Орлов І. О., Болховітін М. І. Виготовлення, налагодження та промислова апробація в умовах ПАТ «Укртрансгаз» приладу для експрес-контролю теплоти згоряння природного газу. *Нафтогазова галузь України*. 2018. №4. С. 32-37. **(Фахове видання)**.

18. Бакулін Є. М., Сидоренко С. П., Давай І. Я., Рибіцький І. В., Карпаш М. О. Досвід використання турбінного вимірювача швидкості потоку газу для експрес-перевірки побутових лічильників газу. *Методи та прилади контролю якості*. 2007. № 18. С. 54-58. **(Фахове видання)**.

19. Чабан Н. І., Рибіцький І. В., Карпаш М. О., Миндюк В. Д. Апробація та аналіз результатів експериментальних досліджень удосконаленого методу контролю фізико-механічних характеристик сталей. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. м. Івано-Франківськ, 2018. №4(69). С. 37-49. **(Фахове видання)**.

20. Rybitskyi I. V., Oliynyk A. P., Yavorskyi A. V., Karpash O. M., Karpash M. O., Tsykh V. S., Slobodyan M. B. Impact Assessment of Non-Technological Fluid Accumulations in the Cavity of an Existing Gas Pipeline on the Energy Efficiency of Its Operation. *Physics and chemistry of solid state*. Vasyl Stefanyk Precarpathian National University. V. 20, № 4. 2019. P. 457-466. **(Фахове видання категорії А, Web of Science)**.

21. Doroshenko, Y., Rybitskyi, I. Investigation of the influence of the gas pipeline tee geometry on hydraulic energy loss of gas pipeline systems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Volume 1, Issue 8-103, 2020, P. 28-34. **(Scopus)**.

22. Okipnyi Igor, Poberezhny Lyubomyr, Zapukhliak Vasyl, Hrytsanchuk Andrii, Poberezhna Liubov, Stanetsky Andrij, Kravchenko Viktoria, Rybitskyi Ihor. Impact of long-term operation on the reliability and durability of transit gas pipelines. *Strojnícky časopis – Journal of mechanical engineering* vol. 70 (2020), no 1, p. 115-126. **(Scopus)**.

23. Rybitskyi I. V., Trofimchuk V. I., Kogut G. M. Enhancing the efficiency of gas distribution stations operation by selecting the optimal gas pressure and temperature parameters at the station outlet. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2020, № 3. p. 47–52. **(Scopus)**.

24. Акустичний спосіб безконтактного контролю глибини корозійного пошкодження трубопроводів. пат. 90007. Україна. №200802378. Заявл. 25.02.2008; опубл. 25.03.2010, Бюл. №6. 5 с.

25. Спосіб експрес-визначення теплоти згоряння природного газу: пат. 92846 Україна. №a200905201; заявл 25.05.2009. опубл. 10.12.2010, Бюл.№ 23, 4 с.

26. Прищепо О. О., Карпаш М. О., Рибіцький І. В. Аналіз характеру та причин відмов запірної арматури на газовому транспорті. Частина 2. *Нафтова і газова промисловість*. 2008. №3. С. 44–47. **(Фахове видання)**.

27. Яворський А. В., Тахар Айфа, Райтер П. М., Рибіцький І. В., Ващишак С. П. Методичне і технічне забезпечення попередження геодинамічної небезпеки в зоні пролягання нафтогазопроводів. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2012. №4(45). С.5-16. **(Фахове видання)**.

28. Способ определения теплоты сгорания природного газа: пат. 121938 Росія. №2011140504/28(060534); заявл. 05.10.2011; опубл. 10.11.2012. 9 с.

29. Пристрій для вимірювання рівня рідини в порожнині газопроводу: пат. 106840 Україна. № а201309982; заявл. 12.08.2013; опубл. 10.02.2014 р., Бюл. № 3. – 9 с.

30. Рибіцький І. В., Трофімчук В.І., Карпаш М.О. Основні чинники енергоемності газотранспортної системи України та роль управлінських заходів для їх зменшення. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2017. №4(65). С. 19-25. **(Фахове видання)**.

31. Чабан Н.І., Карпаш О. М., Рибіцький І. В., Миндюк В. Д. Аналіз методів акустичного контролю фізико-механічних характеристик металоконструкцій довготривалої експлуатації. *Методи та прилади контролю якості*. 2018. №1(41). С. 38-43. **(Фахове видання)**.

32. Карпаш М. О., Слободян М. Б., Рибіцький І. В. Аналіз організаційних заходів щодо підвищення енергоефективності на об'єктах газотранспортної системи України. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2017. №4(65). С. 111-115. **(Фахове видання)**.

33. Рибіцький І. В., Трофімчук В. І. Відбір тепла із лінії трубопроводів охолоджуючого масла газоперекачуючого агрегату та способи його ефективного використання. *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. Випуск 6/2019 (119). Галузеве машинобудування*. С. 133-139. **(Фахове видання)**.

34. Спосіб експрес визначення теплоти згоряння природного газу з урахуванням температури: пат. 114212 . Україна. №а201500678; заявл. 28.01.2015. опубл. 10.03.2017, Бюл. № 5, 7с.

35. Миндюк В. Д., Чабан Н. І., Рибіцький І. В., Карпаш О. М.. Зв'язок між параметрами акустичних структурних шумів та механічними властивостями конструкційних сталей. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. 2020. № 3. С. 30-37. **(Фахове видання, Scopus та Web of Science)**.

36. Рибіцький І. В., Карпаш О. М., Карпаш М. О. Моделювання можливості вимірювання вищої теплоти згоряння природного газу за наявних інформативних параметрів. *Методи та прилади контролю якості*. N 1(44) 2020. С. 147-154. **(Фахове видання)**.

#### **Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:**

37. Яворський А.В., Карпаш О.М., Рибіцький І. В. Розроблення та апробація системи для вимірювання рівня рідини в порожнинах діючих газопроводів. *Неруйнівний контроль та технічна діагностика – UkrNDT-2009* : 6-а національна науково-технічна конф., 9–12 червня 2009 р. : збірник доповідей. Київ : УТ НКТД, 2009. – 402с.

38. Яворський А. В., Карпаш О. М., Рибіцький І. В. Система для вимірювання рівня рідини в порожнинах діючих газопроводів. *Забезпечення експлуатаційної надійності систем трубопроводного транспорту* : науково-



технічний семінар. 10-11 червня 2009 р. : збірник доповідей. м. Київ : НТК ІЭС ім. Е.О. Патона. 2009. 139с.

39. Карпаш О.М., Яворський А. В., Карпаш М. О., Рибіцький І. В., Тацакович Н. Л., Доценко Є. Р. Нові розробки в галузі технічної діагностики об'єктів довготривалої експлуатації нафтогазової галузі. *Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій* : VIII Міжнародний симпозіум, 5 – 8 жовтня 2009 р. Національна Академія наук України, МФРБМК, Київ. 2009.

40. Карпаш О.М., Давай І. Я., Рибіцький І.В., Карпаш М. О. Апробація нового методу визначення теплоти згоряння природного газу. *Електромагнітні та акустичні методи неруйнівного контролю матеріалів та виробів. Леотест-2010* : 15 Міжнародна науково-технічна конференція, 15-20 лютого 2010 р. Славське Львівської обл. Українське товариство неруйнівного контролю та технічної діагностики, 2010. с. 20.

41. Karpash O., Karpash M., Rybitsky I., Koturbash T. Experimental assembly for air-coupled ultrasonic hardware thickness control. *Proceedings of 5th International Symposium on Hydrocarbons and Chemistry (ISHC5)*, Sidi Fredj, Algeria, May 23-25, 2010, P.115.

42. Rybitskyi I. V., Yavorskyi A. V., Banahevych R. Yu. Stationary system of measuring the liquid level in the cavities of the existing gas pipeline. *NDT days 2011*”. “Дни на безразрушителния контрол 2011. Научни известия на НТСМ. Sozopol. Republic of Bulgaria. 2011. №1 (121). С. 93-95.

43. Рибіцький І. В., Банахевич Р. Ю., Яворський А. В., Карпаш М.О. Чинники утворення гідратних накопичень в порожнинах труб газопроводів та способи їх моніторингу. *Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики машинобудівного і нафтогазопромислового обладнання* : шоста Міжнародна науково-технічна конференція і виставка : збірник тез доповідей. 29 листопада – 2 грудня 2011 р. м. Івано-Франківськ : ІФНТУНГ. 2011. С. 150-155.

44. Банахевич Р. Ю., Карпаш О. М., Рибіцький І. В., Яворський А. В. Система моніторингу рівня жидкості в порожнині газопроводів. *Надежность и безопасность магистрального трубопроводного транспорта* : матеріали VII міжнародної науково-технічної конференції. 22-25 листопада 2011 г. Новополюск : ПГУ. 2011. С. 133-134.

45. Миндюк В. Д., Карпаш М. О., Яворський А. В., Доценко Є. Р., Рибіцький І. В. Оцінка ступеню деградації матеріалу труб аміакопроводу неруйнівними методами контролю. *Електромагнітні та акустичні методи неруйнівного контролю матеріалів та виробів. Леотест-2012* : матеріали 17 Міжнародної науково-технічної конференції, 20-25 лютого 2012р. м. Славське Львівська обл. С. 58 – 62.

46. Рибіцький І. В., Банахевич Р. Ю., Яворський А. В., Карпаш М. О. Моніторинг скупчень газоконденсату та рідини в порожнинах діючих газопроводів. *Електромагнітні та акустичні методи неруйнівного контролю матеріалів та виробів. Леотест-2012* : Матеріали 17 Міжнародної науково-

технічної конференції, 20-25 лютого 2012р. м. Славське Львівська обл. С. 109 – 113.

47. Гвідо ван Баелен, Яворський А. В., Йенс Антонсон, Рибіцький І. В., Карпаш М. О. Методи та засоби виявлення витоків та втрат вуглеводневих енергоносіїв в системах транспортування та зберігання нафти і газу. *Проблеми і перспективи транспортування нафти і газу* : матеріали міжнародної науково-технічної конференції, м. Івано-Франківськ, 15-18 травня 2012р. Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, 2012. С.282–289.

48. Банахевич Р. Ю., Карпаш О. М., Карпаш М. О., Яворський А. В., Рибіцький І. В. Експериментальні дослідження методу визначення рівня скупчення рідини в порожнині магістральних газопроводів. *Нафтогазова енергетика 2013* : міжнародна науково-технічна конференція, 7 – 11 жовтня 2013 р. м. Івано-Франківськ, 2013. С. 228 – 231.

49. Karpash M. O., Yavorsky A. V., Rybitsky I. V., Visochansky I. I., Daravay I. Y. Progress in the field of development of means for express control of natural gas combustion heat. *Proceedings of Scientific and Technical Union of Mechanical Engineering. year XXIII. 2015. №2(165). P.p. 43-45.*

50. Рибіцький І. В., Яворський А. В., Райтер П. М. Досвід виявлення та оцінки втрат природного газу на автомобільних газонаповнювальних компресорних станціях. *Неруйнівний контроль та технічна діагностика – UkrNDT-2016* : 8-а національна науково-технічна конф., 22 – 24 листопада 2016 р. : матеріали конференції. Київ : УТ НКТД, 2016. 380с. С.197-202.

51. Карпаш О. М., Яворський А. В., Рибіцький І. В. Технологія і устаткування для моніторингу нетехнологічних скупчень рідини в порожнинах діючих газопроводів. *Неруйнівний контроль в контексті асоційованого членства України в Європейському Союзі – NDT-UA 2017* : збірник доповідей 1-ої науково-технічної конференції з міжнародною участю. 24–27 жовтня 2017 р. м. Люблін, Польща : УТ НКТД, 2017. 91 с. с. 34-37.

52. Слободян М. Б., Карпаш М. О., Рибіцький І. В. Розроблення технічних рішень для забезпечення технологічної та екологічної безпеки на газовому транспорті. *Неруйнівний контроль в контексті асоційованого членства України в Європейському Союзі – NDT-UA 2017* : збірник доповідей 1-шої науково-технічної конференції з міжнародною участю. 24–27 жовтня 2017 року. м. Люблін, Польща: УТ НКТД, 2017. 91 с. с. 81-84.

53. Рибіцький І. В., Височанський І. І., Карпаш М. О., Райтер П. М., Яворський А. В. Удосконалення технології та розробка пристрою експрес-контролю теплоти згорання природного газу. *Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики машинобудівного і нафтогазопромислового обладнання* : восьма Міжнародна науково-технічна конференція пам'яті професора Ігоря Кісіля : Збірник матеріалів доповідей (14 – 16 листопада 2017 р.). Івано-Франківськ : ІФНТУНГ. 2017. С. 171-173.

54. Рибіцький І.В., Карпаш О.М., Слободян М.Б. Технічне діагностування трубопроводних систем з врахуванням критеріїв їх енергоефективності. *Тези допов. міжнар. конф. під ред. Ю.М. Посипайко. Київ: Міжнародна Асоціація «Зварювання», 2018. – 66 стор. XXII Міжнародна конференція «Сучасні методи*

та засоби неруйнівного контролю і технічної діагностики». 10-14 вересня 2018р., м. Одеса. Присвячується 100-річчю Національної академії наук України. С. 15.

55. Рибіцький І. В., Чабан Н. І. Нова технологія удосконалення безпеки експлуатації газотранспортних систем. *Прикладні науково-технічні дослідження* : матеріали III міжнар. наук.-практ. конф., 3-5 квіт. 2019 р. Академія технічних наук України. Івано-Франківськ : Симфонія форте, 2019. 242 с.

56. Карпаш О. М., Карпаш М. О., Яворський А. В., Рибіцький І. В. Технологія і устаткування для моніторингу нетехнологічних скупчень рідини в порожнинах діючих газопроводів. *Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики машинобудівного і нафтогазопромислового обладнання* : восьма Міжнародна науково-технічна конференція пам'яті професора Ігоря Кісіля : збірник матеріалів доповідей. 14 – 16 листопада 2017 р. м. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2017. С. 139-141

57. Рибіцький І. В., Карпаш М. О., Яворський А. В., Райтер П. М., Карпаш О. М. Алгоритмічні та схемотехнічні рішення підвищення точності вимірювання теплотворної здатності природного газу пристроєм GAS-HI-Q. *Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах (Measurement, control and diagnosis in technical systems) (ВКДТС-2019)* : п'ята міжнародна наукова конференція : збірник тез доповідей. 29 – 31 жовтня 2019 р. Вінниця : ВНТУ, 2019. С. 10-11.

58. Карпаш М. О., Рибіцький І. В., Яворський А. В., Райтер П. М. Експрес-контроль теплоти згоряння природного газу. *Неруйнівний контроль та технічна діагностика – UkrNDT-2019* : збірник доповідей 9-ї Національної науково-технічної конференції. м. Київ, УТ НКТД, 2019. 270 с. с.139-144.

## АНОТАЦІЯ

**Рибіцький І.В. – Новітні методи та засоби контролю експлуатаційних параметрів газопровідних систем.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.11.13 «Прилади і методи контролю та визначення складу речовин» (152 – Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка). – Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ, 2021.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню важливої науково-прикладної проблеми в галузі методів та приладів контролю експлуатаційних параметрів газопровідних систем, що досягається шляхом розроблення новітніх засобів контролю експлуатаційних параметрів газопровідних систем та дослідженням нових інформативних параметрів контролю як технічного стану так і режиму роботи газопровідних систем.

Подано результати аналізу сучасного стану та тенденцій розвитку методів, засобів та технологій неруйнівного контролю експлуатаційних параметрів трубопровідних систем з метою пошуку шляхів їх удосконалення з

використанням нових інформативних параметрів, в тому числі за критеріями енергоефективності. Наведено характер залежності впливу дефектів трубопровідних систем, зокрема таких як негерметичність та порушення геометрії, на режими експлуатації та енергоефективність роботи трубопровідних системи.

Встановлено характер впливу не технологічних скупчень в порожнині трубопроводу на експлуатаційні показники та енергоефективність його роботи, удосконалено метод виявлення таких скупчень та подано результати його експериментального дослідження та промислових випробувань. Розкрито вид зв'язку впливу властивостей природного газу, що транспортуються в трубопроводі, на експлуатаційні показники та енергоефективність роботи газопровідних систем. Подано результати аналізу існуючих методів, методик та технічних засобів контролю витоків з трубопровідних систем та обладнання, наведено методики вибору обладнання для контролю наявності та величини витоків вуглеводнів. Удосконалено технології та технічні засоби контролю властивостей природного газу, подано результати їх апробації та дослідження впливу фізико-хімічних властивостей природного газу на технічний стан, режими експлуатації та енергоефективність роботи трубопровідних систем та обладнання.

**Ключові слова:** технічна діагностика, контроль технічного стану, енергоефективність, методика, фізико-хімічні характеристики, дефекти, теплота згоряння природного газу, нормативний документ.

## АННОТАЦІЯ

**Рибицкий И.В. - Новейшие методы и средства контроля эксплуатационных параметров газопроводных систем.**

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.11.13 «Приборы и методы контроля и определения состава веществ» (152 - Метрология и информационно-измерительная техника). - Иванов-Франковский национальный технический университет нефти и газа, Иванов-Франковск, 2021.

Диссертация посвящена решению важной научно-прикладной проблемы в области методов и приборов контроля эксплуатационных параметров газопроводных систем, достигается путем разработки новых средств контроля эксплуатационных параметров газопроводных систем и исследованием новых информативных параметров контроля как технического состояния так и режима работы газопроводных систем.

Представлены результаты анализа современного состояния и тенденций развития методов, средств и технологий неразрушающего контроля эксплуатационных параметров трубопроводных систем с целью поиска путей их совершенствования с использованием новых информативных параметров, в том числе по критериям энергоэффективности. Приведены характер зависимости влияния дефектов трубопроводных систем, в частности таких как

негерметичность и нарушения геометрии, на режимы эксплуатации и энергоэффективность работы трубопроводных системы.

Установлен характер влияния не технологических скоплений в полости трубопровода на эксплуатационные показатели и энергоэффективность его работы, усовершенствован метод выявления таких скоплений и представлены результаты его экспериментального исследования и промышленных испытаний. Раскрыто вид связи влияния свойств природного газа, транспортируемых в трубопроводе, на эксплуатационные показатели и энергоэффективность работы газопроводных систем. Представлены результаты анализа существующих методов, методик и технических средств контроля утечек из трубопроводных систем и оборудования, приведены методики выбора оборудования для контроля наличия и величины утечек углеводородов. Усовершенствована технологии и технические средства контроля свойств природного газа, представлены результаты их апробации и исследования влияния физико-химических свойств природного газа на техническое состояние, режимы эксплуатации и энергоэффективность работы трубопроводных систем и оборудования.

**Ключевые слова:** техническая диагностика, контроль технического состояния, энергоэффективность, методика, физико-химические характеристики, дефекты, теплота сгорания природного газа, нормативный документ.

## ABSTRACT

**Ihor Rybitskyi – The newest methods and devices for control of gas pipeline systems operational parameters.**

The dissertation on reception of a scientific degree of the Doctor of Technical Sciences in the specialty 05.11.13 “Instruments and methods of control and composition of material determination” (152 - Metrology and information-measuring equipment). – Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, 2021.

The dissertation is devoted to the solution of an important scientific and applied problem in the field of methods and devices of control of operational parameters of gas pipeline systems, which is achieved by developing new means of control of operational parameters of gas pipeline systems and research of new informative parameters of control.

The results of the analysis of the current state and trends in the development of methods, tools and technologies of non-destructive testing of operational parameters of gas pipeline systems and equipment are presented. It is shown that determination of technical condition and diagnostics of pipeline systems is carried out mainly on separate informative parameters without their complex account, thus the conclusion on possibility of the further operation of the equipment is accepted on the basis only of results of control of a technical condition of material of pipelines.

The results of the developed theoretical bases and the received mathematical dependence of influence of the small size of through defects of walls of pipelines on process of gas transportation are resulted. It is proved that the presence of such defects

not only creates dangerous emergencies with pipeline destruction and environmental damage, but also affects the efficiency of pipeline systems and equipment, creating local flow resistance and reducing the capacity and energy efficiency of pipeline systems.

Mathematical models of the influence of changes in the geometry of the cross section of the pipeline, non-technological accumulations in the pipeline cavity and physicochemical parameters of natural gas on the capacity of pipeline systems are obtained. Mathematical dependences make it possible to assess the impact of these changes on the energy efficiency of gas pipelines and equipment. The economic effect of the implementation of the measure taking into account the physics and chemical parameters of natural gas in the operation of gas distribution equipment is estimated.

The results of theoretical and experimental researches of advanced methods are presented: control of heat of combustion of natural gas, which consists in expansion of possibility, in particular increase of a range of measurements and increase of accuracy of measurements. Improvements have been made by using a number of circuit solutions that reduce the effect of half-wave loss error in ultrasonic measurements and the developed algorithm for finding the reference point of the acoustic signal, as well as the ability to measure not only lower but also higher heat of combustion of natural gas. from the content of carbon dioxide, the speed of propagation of ultrasonic vibrations in the sample of natural gas and the value of the lower heat of combustion; measurement of the level of accumulations in the cavity of the pipeline, which allowed to measure the level of various liquids separately in the operating modes of gas transportation by gas pipelines. The results of experimental researches of a new method of control of presence and measurement of volume of leaks of natural gas on crane knots and the equipment of the main pipelines are resulted. The method has passed successful industrial tests and has shown its effectiveness in detecting both micro and very large, pre-emergency leaks.

Experimental studies of a new informative parameter, namely the value of the integrated image density of acoustic structural noise, which are obtained using an ultrasonic flaw detector working with piezoelectric transducers with phased arrays, which allowed to develop a new method to prevent defects in steel pipelines at the stage of their nuclei microstructural level and determination of the yield strength of the metal of the pipeline.

New technical means have been developed and implemented (device for measuring higher heat of natural gas combustion, installation for measuring liquid levels in the gas pipeline cavity, installation for measuring natural gas leakage levels from gas pipelines and equipment) and technologies their industrial tests were carried out. A number of normative documents of various categories (measurement methods, methodological support for determining the volume of natural gas leaks, technical conditions for the manufacture of developed systems) and a standard regulating the measurement of heat of combustion of natural gas by correlation have been developed.

**Keywords:** technical diagnostics, control of technical condition, energy efficiency, technique, physical and chemical characteristics, defects, heat of combustion of natural gas, normative document.