

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

**ХИМКО ОЛЬГА МИРОСЛАВІВНА**

УДК 681.518

**МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ, МЕТОДИ ТА АЛГОРИТМИ ДЛЯ  
АВТОМАТИЗАЦІЇ УПРАВЛІННЯ ГАЗОТРАНСПОРТНИМИ СИСТЕМАМИ**

05.13.07 – автоматизація процесів керування

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Львів – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному університеті «Львівська політехніка».

**Науковий консультант:** доктор фізико-математичних наук, професор  
**Чекурін Василь Феодосійович**, Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я. С. Підстригача НАН України, завідувач відділу.

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Горбійчук Михайло Іванович**, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, завідувач кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій;

доктор технічних наук, професор  
**Безкорвайний Володимир Валентинович**, Харківський національний університет радіоелектроніки, професор кафедри системотехніки;

доктор технічних наук, професор  
**Тимченко Олександр Володимирович**, Українська академія друкарства, професор кафедри комп'ютерних наук та інформаційних технологій.

Захист відбудеться 14 травня 2021 р. о 12:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.04 в Національному університеті «Львівська політехніка» за адресою: 79013, Львів-13, вул. С. Бандери, 12, ауд. 226 головного корпусу.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного університету «Львівська політехніка» (79013, Львів-13, вул. Професорська, 1).

Автореферат розісланий 9 квітня 2021 р.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради,  
кандидат технічних наук, доцент

 Вашкурак Ю. З.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Газотранспортні системи (ГТС) являють собою великомасштабні інженерні об'єкти, призначені для транспортування великих обсягів природного газу на значні відстані на замовлення постачальників та споживачів.

Інженерно-технічний комплекс ГТС є об'єктом тривалої експлуатації. Технологічні процеси в ГТС супроводжуються взаємопов'язаними процесами перенесення маси, імпульсу та енергії газовими потоками в трубопроводах і пористих пластах підземних сховищ газу (ПСГ), а також фізико-механічними процесами в технологічному обладнанні, спорудах, пластах ПСГ та довкіллі. Під дією експлуатаційних навантажень та впливу середовища його технологічні елементи змінюють свої характеристики, внаслідок чого їхні актуальні значення відомі лише наближено.

Функціонування бізнес-структур, які забезпечують потреби клієнтів ГТС, відбувається в умовах істотної невизначеності, спричиненої мінливістю ринку газотранспортних послуг та політичної ситуації. Тому ГТС треба розглядати як виробничо-комерційну структуру, для якої характерна істотна невизначеність її актуального технічного стану, а також розмитість вхідних даних, які використовують для формування режимів її експлуатації.

Висока ефективність МГ досягається застосуванням труб великого діаметру та підтриманням високого тиску газу в магістралях за допомогою компресорних станцій (КС). За тривалої експлуатації надійність технологічних об'єктів неминуче знижується. Значна частина магістральних газопроводів (МГ) України вже вичерпали свої нормативні терміни експлуатації. Технічне обслуговування та планові відновлювальні ремонти підтримують надійність об'єктів МГ у певних межах. Проте все ж наявні загрози порушення цілісності технологічних об'єктів МГ і пов'язані із ними ризики виникнення ситуацій, небезпечних для довкілля й людей, а також зростають рівні можливих матеріальних та фінансових втрат. Технологічні об'єкти МГ, як-от газорозподільні станції, резервні нитки, переходи через природні та штучні перешкоди, класифікуються як об'єкти підвищеної небезпеки. За таких умов ефективна й безпечна експлуатація ГТС можлива лише за застосування автоматизації й комп'ютеризації всіх процесів, які визначають її функціонування – комерційних, виробничих і технологічних. Для підвищення керованості ГТС і ефективності її експлуатації необхідно автоматизувати інформаційні та бізнес-процеси на стратегічному й оперативному рівнях із застосуванням математичного моделювання та комп'ютеризації. Неперервний контроль цілісності МГ, які експлуатують тривалий час, дасть змогу знизити ймовірність неконтрольованої розгерметизації. Це узгоджується з нормативними документами й сучасними підходами до управління цілісністю трубопровідних транспортних систем.

Сучасний стан автоматизації управління ГТС України сформувався за останні десятиліття внаслідок розрізненої модернізації певних об'єктів газотранспортної інфраструктури, певних технологічних процесів та напрямів управління. Автоматизацію технологічних процесів і комп'ютеризацію управління ГТС на оперативному та стратегічному рівнях проводили без належної координації дій і прагнення забезпечити інформаційну сумісність засобів автоматизації різних рівнів управління.

Одним із наслідків цього є відсутність автоматизованого обміну даними на вертикалі «керування технологічними процесами – стратегічне управління». Тому інформаційні потоки на цій вертикалі, як зверху вниз, так і у зворотному напрямку, все ще здійснюють переважно із використанням паперових чи електронних документів. Фактично в ГТС України використовують традиційні методи управління бізнесом, які базуються на функціональній моделі. Недоліки такого підходу відомі, це, зокрема: слабка зорієнтованість на кінцевий результат, неможливість швидкого реагування на динамічну зміну обставин, неузгодженість із клієнтоорієнтованим підходом та високі транзакційні витрати. Транзакційні витрати тут визначають як втрати через неефективність методів обміну інформацією.

Керованість ГТС і ефективність її виробничої й комерційної діяльності можна значно підвищити способом комп'ютеризації управління на стратегічному та оперативному рівнях, автоматизації інформаційних потоків на всій вертикалі управління. Для цього треба усунути інформаційну гетерогенність ГТС, запровадити автоматичний моніторинг оперативних даних та їхнього накопичення, створити централізовану інформаційну систему з можливістю дистанційного доступу до її даних суб'єктами управління різних рівнів. Це забезпечить передумови для запровадження методології управління, яка базується на процесній моделі.

Актуальність теми дисертаційної роботи визначається тим, що вона спрямована на розроблення математичних моделей і методів, алгоритмів і методологічних основ, необхідних для створення і впровадження системи автоматизації на всіх рівнях управління ГТС та автоматизації інформаційних потоків як на вертикалі «керування технологічними процесами – стратегічне управління», так і на рівнях оперативного і стратегічного управління.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дослідження, за темою дисертаційної роботи виконувалися згідно з планами наукової роботи кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій Національного університету «Львівська політехніка» та Центру математичного моделювання Інституту прикладних проблем механіки і математики ім. Я. С. Підстригача НАН України в рамках держбюджетних тем:

- «Моделювання процесів масопереносу в складних мережевих структурах для визначення оптимальних параметрів керування динамічними режимами» 0117U006866, 2016 – 2017 рр.,

- «Математичне та комп'ютерне моделювання зв'язаних процесів різної фізичної природи в об'єктах складної внутрішньої структури і топології та створення програмного забезпечення» 0117U006866, 2018 – 2020 рр.

та низки госпдоговірних робіт:

- «Методика визначення запасу газу газотранспортних підприємств» р. р.). № держреєстрації 0104U009759, замовник ДК „Укртрансгаз” НАК «Нафтогаз України», (2004–2005);

- «Розроблення стандарту організації ПАТ „Укртрансгаз”, який регламентує вимоги щодо застосування витратомірів змінного перепаду тиску за умови невідповідності геометричних характеристик вимірювальних трубопроводів і

діафрагм вимогам ДСТУ ГОСТ 8.586.1–5:2009», № держреєстрації 0117U001457, замовник ПАТ “Укртрансгаз”, (2017–2018 р. р.);

- «Аналіз умов функціонування вузла обліку природного газу ТзОВ «Радохівський цукор» (Хоростківський підрозділ) упродовж вересня 2018 року» (2019 р.) *Замовник* ПАТ “Тернопільгаз”.

- «Розроблення національного стандарту України ДСТУ EN 12480 (EN 12480:2018, IDT) „Лічильники газу. Роторні лічильники газу” методом перекладу». (2019–2020 р. р.). № держреєстрації 0120U100612. *Замовник* НАК „Нафтогаз України”, в яких здобувачка брала участь як виконавець.

**Мета і задачі дослідження.** Метою роботи є розроблення математичних моделей, методів і алгоритмів для розв’язування задач керування стаціонарними та перехідними режимами течії газу в МГ, виявлення та ідентифікації витоків, а також опрацювання основ автоматизації управління газотранспортними системами і визначення структури і функцій таких систем. Для досягнення цієї мети необхідно було вирішити такі завдання:

- провести аналіз ГТС України як об’єкта автоматизації, розробити відповідні моделі та оцінити актуальний стан автоматизації процесів на всіх рівнях управління;
- розробити математичну модель структури ГТС, що враховує можливі зміни її конфігурації в процесі експлуатації, а також її розмірну гетерогенність;
- з використанням рівнянь динаміки газу розробити нелінійні математичні моделі течії газу в лінійних та вузлових елементах МГ з урахуванням можливої негерметичності цих елементів, сформулювати на цій основі задачі для опису технологічних процесів керування режимами роботи ГТС, виявлення витоків і контролю цілісності МГ;
- використовуючи відомі обчислювальні методи, розробити методики розв’язування сформульованих нелінійних прямих задач та швидкі алгоритми для їхньої реалізації;
- розробити математичну модель для опису поширення малих збурень тиску в потоці газу в МГ і провести кількісні дослідження параметрів хвильових процесів, спричинених такими збуреннями;
- провести кількісні дослідження параметрів перехідних процесів течії газу в МГ, які виникають під час зміни режимів транспортування, отримати кількісні оцінки ефективності транспортування газу МГ під час перехідного режиму, залежно від умов керування;
- провести кількісні дослідження параметрів перехідних процесів течії газу, які виникають у МГ під час його локальної розгерметизації та дослідити параметри течії, які можна використати для виявлення та ідентифікації витоків;
- розробити математичний апарат для методів виявлення та ідентифікації витоків у МГ і дослідити їхню ефективність із використанням обчислювальних експериментів;
- розробити концепцію автоматизації управління ГТС України, яка базується на теорії систем оперативного управління виробництвом MES та на моделі PERA функціональної ієрархії корпорації відповідно до міжнародного стандарту ANSI/ISA-95.

– визначити функції та розробити структуру програмної системи для автоматизації управління ГТС, а також системи моніторингу цілісності МГ у її складі.

**Об’єктом дослідження** є процеси управління газотранспортними системами на технологічному, оперативному і стратегічному рівнях.

**Предметом дослідження** є розроблення методологічних основ, математичних моделей, методів і алгоритмів для автоматизації управління газотранспортними системами з використанням теорії MES-систем, моделі PERA та положень міжнародного стандарту ANSI/ISA-95.

**Методи досліджень.** Для вирішення поставлених у дисертаційній роботі задач використано: еталонну модель PERA для опису архітектури корпорацій, стандарти ANSI/ISA-88 та ANSI/ISA-95, методологію моделювання систем IDEF0, моделі газової динаміки, методи дискретизації систем рівнянь із частинними похідними, ітераційні методи розв’язування нелінійних систем звичайних диференціальних рівнянь, метод обчислювального експерименту.

**Достовірність отриманих результатів** і висновків забезпечується: застосуванням фундаментальних фізичних принципів та перевірених підходів до опису процесів перенесення маси, імпульсу та енергії газовими сумішами; коректністю і строгістю математичних викладок і постановок задач газової динаміки; застосуванням відомих і перевірених ітераційних підходів, методів скінченних різниць і Рунге-Кутти до розв’язування сформульованих задач; кількісними дослідженнями практичної збіжності алгоритмів розв’язування задач, проведеними з використанням методу обчислювального експерименту; узгодженням побудованих математичних моделей та отриманих результатів кількісних досліджень із фундаментальними принципами та фізичною суттю досліджуваних процесів; повним узгодженням у відповідних часткових випадках побудованих математичних моделей та отриманих результатів кількісних досліджень із відомими в літературі моделями та результатами теоретичних і експериментальних досліджень; а також тестуванням розроблених математичних моделей, методів і алгоритмів, проведеним спільно зі співробітниками НДІ транспорту газу ПАТ «УКРТРАНСГАЗ» на діючій підсистемі магістрального газопроводу в процесі дослідного впровадження розробленої на основі результатів роботи методики оперативного балансування маси газу в МГ.

#### **Наукова новизна отриманих результатів.**

Під час вирішення поставлених завдань дослідження отримані нові наукові результати.

1. Розроблено дворівневу математичну модель структури ГТС, що враховує можливі зміни її конфігурації в процесі експлуатації, а також її розмірну гетерогенність, яка виникає внаслідок наявності у її складі трубопроводів, довжина яких набагато більша за їхній діаметр (лінійні елементи), і вузлових елементів, розміри яких у напрямку потоку є співмірні із діаметром внутрішньої порожнини.

2. З використанням рівнянь динаміки газу розроблені нелінійні математичні моделі течії газу в лінійних та вузлових елементах МГ, що дало змогу забезпечувати оперативне балансування маси газу в МГ.

3. Адаптовані відомі методи скінченно-різницевої дискретизації ключових рівнянь за просторовою координатою, методи ітераційного підходу та методи Рунге-Кутти дали

змогу розв'язування сформульованих нелінійних прямих задач, що спростило дослідження розроблених моделей.

4. Розроблено математичну модель поширення малих збурень параметрів потоку газу в трубопроводі, яка описує хвильові процеси, спричинені нестабільністю роботи компресорів, локальною розгерметизацією, флуктуаціями тиску, густини й температури, що дало змогу виявляти локальну розгерметизацію та ідентифікувати витіки.

5. Розроблені моделі керування перехідними процесами, з використанням яких будь-який процес переходу з одного стаціонарного режиму в інший визначається скінченним набором числових параметрів, що дає змогу визначити ефективність транспортування газу під час перехідних режимів, а також провести кількісні дослідження перехідних процесів течії газу в секції МГ за різних моделей керування.

6. Розроблені математичні моделі локального витіку із МГ, які визначають інтенсивність витікання газу через малий отвір у стінці труби залежно від тиску й температури газу в трубі в околі місця розгерметизації, що дало змогу кількісно дослідити параметри течії, які можна використати для виявлення та ідентифікації витоків.

7. Запропонована концепція автоматизації управління ГТС України, яка базується на теорії MES систем та моделі PERA відповідно до вимог міжнародного стандарту ANSI/ISA-95, також визначені функції й розроблена структура програмної системи для автоматизації управління ГТС.

#### **Практичне значення одержаних результатів.**

Розроблена в роботі дворівнева модель структури ГТС відображає розмірну гетерогенність технологічних об'єктів і дає змогу розглядати структуру ГТС із детальністю, необхідною для розв'язування кожної конкретної технологічної задачі, що виникає в процесі управління. Цю модель можна використовувати для оперативного керування активною конфігурацією ГТС у процесі її експлуатації, щоб неперервно підтримувати відповідність між плановими обсягами транспортованого газу та задіяними на даний момент часу потужностями ГТС. Це дасть змогу знизити затрати паливного газу, мінімізувати експлуатаційні навантаження на технологічне обладнання й негативний вплив на довкілля.

Модифікована безрозмірна форма подання систем рівнянь моделі динаміки газу в лінійних і вузлових елемента дала змогу розробити швидкі ітераційні алгоритми для числового моделювання течії газу МГ у реальному часі та дала змогу розв'язувати технологічні задачі керування стаціонарними й перехідними режимами роботи, виявлення й ідентифікації витоків, оперативного балансування маси газу в МГ тощо.

Розроблена математична модель поширення малих збурень тиску в потоці газу МГ і результати проведених із її використанням числових досліджень дають змогу проводити апріорні оцінки впливу випадкових флуктуацій на розмитість даних моніторингу параметрів течії в контрольних точках, а отже оцінювати чутливість і точність систем виявлення та ідентифікації витоків, які використовують ці дані.

Запропоновані інтегральні параметри течії газу в перехідних режимах дають змогу проводити кількісне оцінювання ефективності перехідного процесу за енергетичними та часовими параметрами. Застосовуючи розроблені швидкі

алгоритми розв'язування крайових задач можна використати для керування перехідними режимами роботи МГ для досягнення заданої тривалості процесу чи заданих енергетичних показників транспортування за період перехідного процесу.

Запропоновані математичні моделі локального витоку й динаміки газу в МГ із витокком, а також розроблені швидкі алгоритми розв'язування крайових задач утворюють теоретичну основу для методу виявлення й ідентифікації параметрів витоків МГ із використанням підходу, що базується на моделюванні процесів перенесення маси, імпульсу та енергії в реальному часі та даних вимірювання параметрів потоків у контрольних точках вздовж трубопроводу.

Впровадження системи автоматизації управління ГТС, структура і функції якої запропоновані в роботі, дасть змогу на базі наявних засобів автоматизації, забезпечити автоматизований обмін інформацією на вертикалі «стратегічне управління – оперативне управління – керування процесами» і в межах кожного рівня управління.

Розроблені методи контролю цілісності технологічних об'єктів ЛЧ МГ, які базуються на даних моніторингу параметрів потоків газу в контрольних точках, а також даних вимірювання параметрів хвиль акустичної емісії, дають змогу знизити втрати газу та ймовірність виникнення аварійних ситуацій.

Впровадження системи автоматизованого управління дасть змогу підвищити ефективність роботи ГТС України за допомогою оптимального керування конфігурацією мережі та режимами транспортування і зберігання газу, автоматизації процесів взаємодії з клієнтами. Це створить передумови для переходу від функціональної до процесної моделі управління.

Розроблені в роботі підходи, математичні моделі, методи та алгоритми передані філії «НДІ транспорту газу» АТ «Укртрансгаз» і застосовані в складі програмного комплексу, створеного у відділі розробки систем оптимального планування і прогнозування режимів роботи ГТС, який використовується в диспетчерському управлінні. Під час експлуатації комплексу проведено тестування переданих результатів на об'єктах ГТС України, що підтвердило їхню ефективність. Проведено дослідне впровадження методики оперативного балансування маси газу на діючій підсистемі магістрального газопроводу «КС Красилів – ПВВГ Дідушичі», що засвідчує відповідний акт впровадження.

**Особистий внесок автора.** Усі результати, які стосуються основного змісту дисертаційної роботи та винесені на захист, отримані здобувачем самостійно. У роботах, які опубліковані в співавторстві, здобувачеві належать: [1], [16], [17] – розроблення математичних моделей та методів для контролю цілісності МГ; [2], [7] – розроблення дворівневої математичної моделі структури ГТС; [3], [25], [26] – математичне моделювання та числове дослідження поширення малих збурень у потоці газу в МГ; [4], [5], [11], [21], [31] – розроблення математичних моделей, методів і алгоритмів для керування течією газу в МГ, проведення числових досліджень, аналіз результатів; [18], [23], [24], [28], [30], [32] – розроблення математичних моделей, методів і алгоритмів для виявлення та ідентифікації витоків у МГ, проведення числових досліджень, аналіз результатів; [8] – [10], [15], [19] – розроблення методології автоматизації газотранспортних систем, яка базується на



теорії MES систем та моделі PERA відповідно до вимог міжнародного стандарту ANSI/ISA-95; [6], [14], [22], [27], [29] – визначення функцій та розроблення архітектури програмно-технічного комплексу для автоматизації управління ГТС; [13] – визначення функцій та розроблення архітектури підсистеми контролю цілісності МГ у складі програмно-технічного комплексу для автоматизації управління ГТС; [33], [34] – із застосуванням розроблених математичних моделей проведені розрахунки, які підтвердили позитивний ефект.

**Апробація результатів роботи.** Основні положення та результати досліджень були представлені на конференціях: 3-й Міжнародній науково-технічній конференції «Комп’ютерні науки та інформаційні технології» CSIT 2008. Львів, 2008; IV Міжнародній науково-технічній конференції «Нафтогазова енергетика 2015» (м. Івано-Франківськ 21–24 квітня 2015 року); XIV Міжнародній конференції з автоматичного управління АВТОМАТИКА – 2017 (Київ 13 – 15 вересня 2017 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Інформаційні технології та комп’ютерне моделювання» (м. Івано-Франківськ 15–20 травня 2017 року.); XXII та XXIII Міжнародних наукових конференціях «Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory (DIPED)». Дніпро, 2017, Тбілісі, 2018; Міжнародній науковій конференції «Сучасні проблеми механіки та математики» (м. Львів 22 – 25 травня 2018 р.); v науково-технічній конференції «Обчислювальні методи і системи перетворення інформації», (м. Львів 4–5 жовтня 2018р.); науково-технічному семінарі «Сучасні технології неруйнівного контролю та їх застосування в промисловості» (м. Київ 21–22 листопада 2018); 10-й Міжнародній науковій конференції «Математичні проблеми механіки неоднорідних структур», (м. Львів 17–19 вересня 2019 р.); 8-й Міжнародній науково-технічній конференції – Інформаційні системи та технології. ICT-2019 (м. Коблеве- м. Харків 9–14 вересня 2019); міжнародному семінарі NATO Workshop «Development of novel methods for the prevention of pipeline failures with security implications» (Lviv, October 26–27, 2020).

У повному обсязі дисертація доповідалася на розширеному засіданні кафедри автоматизації та комп’ютерно-інтегрованих технологій Національного університету «Львівська політехніка» під керівництвом доктора технічних наук професора Пістуна Є. П. та науковому семінарі Центру математичного моделювання Інституту прикладних проблем механіки і математики ім. Я. С. Підстригача НАН України під керівництвом доктора технічних наук, ст. наук. співробітника П’янило Я. Д.

**Публікації.** За матеріалами дисертації опубліковано 34 наукових праці, з яких два розділи в закордонних монографіях [1,2], 18 статей [3–20] – у фахових виданнях України, одна стаття [21] – у науковому періодичному виданні держави, що входить до Європейського союзу, два патенти України [33, 34], 8 публікацій [25–32] – у збірниках праць і тезах міжнародних конференцій; п’ять публікацій [1, 3–5,25] реферовані в базі SCOPUS.

**Структура роботи.** Дисертаційна робота складається з анотації, вступу, шести розділів, які містять 186 рисунків і 1 таблицю, висновків, а також списку літератури, що включає 177 найменувань, додатків. Обсяг основного тексту дисертації займає 305 сторінок, а повний обсяг роботи – 452 сторінки.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційного дослідження, встановлено зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, сформульовані мета й задачі дослідження, окреслені об'єкт, предмет та методи досліджень, визначена достовірність отриманих результатів, їхня наукова новизна і практичне значення. Наведено дані про впровадження результатів роботи, їхню апробацію, особистий внесок та публікації.

У першому розділі подано огляд літератури за темою дослідження, а також виконано аналіз ГТС України як об'єкта автоматизації.

Теоретичні основи для опису транспортування газу трубопроводами можна знайти в класичних монографіях. Як приклад можна навести монографію Бобровського С. А., Щербакова С. Г., Яковлева Е. И., Гарляускаса А. И., Грачева В. В., у якій розглянуті технологічні основи транспортування газу трубопроводами, математичні моделі для опису стаціонарних і нестаціонарних режимів течії газу в трубопроводах і методи розрахунку режимів роботи складних систем магістральних газопроводів. Проте, тут розглядаються, переважно, наближені методи аналітичного розрахунку з використанням лінеаризованих моделей газової динаміки. За останні два десятиріччя з'явилася низка нових монографій авторів Joseph Daniel D., Renardy Yuriko Y.; Селезнев В. Е., Алешин В. В., Клишин Г. С.; Mikhail V. Lurie; Maric I. Ivek I.; Wang X., Economides M.; Gerhart P.M., Gerhart A.L., Hochstein J.I. та інші, у яких розглядаються істотно нелінійні задачі течії газу в трубопроводах, використовуються високоточні термічні й калоричні рівняння стану газових сумішей, враховується взаємовплив процесів перенесення маси, імпульсу й енергії. Для розв'язування задач, сформульованих у рамках сучасних моделей газової динаміки використовують числові методи, які базуються на методах скінченних різниць та скінченних елементів. Числові методи дослідження течії газу в трубопроводах розглядалися багатьма авторами. Це, зокрема, – Kralik J., Stiegler P., Vostry Z., Zavoroka J., Chaczykowski M., Oosterkamp A., Helgaker J. F., Ytrehus T. Моделюванню течії газу в трубопроводах за наявності витоків присвячені роботи авторів Богомолова С. В., Гаврилюка К. В., Мухина С. И., Nouri-Vorujerdi A., Воеводина А. Ф., Никифоровської В. С., Geiger G., Murvay P.-S., I.Silea. Питанням автоматизації управління соціотехнічними системами присвячені праці авторів Williams T. J., Bernus P., Nemes L., Шопина А. Г., Занина И. В., Бурдина А. В., Решетникова И. С., Пономарева Ю., Клюка Б., Борисенко В. Тут, зокрема, розглядається еталонна модель PERA виробничої компанії та теорія MES систем. Значний внесок у розвиток наукових досліджень трубопровідного транспорту внесли вітчизняні вчені. Це – Тевяшев А., Дістрянов С., Грудз В., Гімлер Р., Притула М. і Притула Н., П'янило Я., Чекурін В.

На ринку програмно-технічних систем для автоматизації управління виробничими підприємствами є досить багато пропозицій для газотранспортної галузі. Частина цих систем збудована відповідно до стандартів ANSI/ISA-95 (ISO/IEC-62264) та ANSI/ISA-88 (IEC 61512). Серед фірм, які займаються розробленням і впровадженням програмно-технічних систем для автоматизації

управління газотранспортними системами є такі світові бренди як ABB, Emerson Process Management, Invensys plc, OSI Soft, PSI, SAP та інші.

ГТС - це логістична система, до складу якої віднесемо інженерно-виробничий комплекс, організаційну структуру, виробничий персонал, матеріальні та фінансові ресурси. Функціонування ГТС визначають різноманітні за своєю природою процеси – фізичні, технологічні, комерційні (бізнес-процеси) та інформаційні, які взаємодіють. Внаслідок реалізації бізнес-процесів відбувається формування: а) транспортних навантажень на ГТС, б) внутрішніх і зовнішніх фінансових потоків в) внутрішніх і зовнішніх потоків матеріальних ресурсів, г) планів розвитку організаційної структури та інфраструктури ГТС д) планів розвитку інтелектуального потенціалу, д) оцінок бізнес-ризиків. Крім того, бізнес процеси визначають реалізацію технологічних процесів щодо їхнього планування, управління й контролю. Інформаційні процеси відповідальні за відбір та нагромадження даних про: параметри фізичних процесів, які протікають у газі ГТС, спорудах ГТС та довокільї, параметри технологічних процесів, стан технологічного устаткування, матеріальні і фінансові ресурси та економічну ефективність роботи ГТС, стан та тенденції розвитку виробничого та інтелектуального потенціалів. Важливою функцією інформаційних процесів є підтримання інформаційних потоків між підсистемами ГТС і різними рівнями управління та суміжними газотранспортними системами.

Для опису фізичних процесів інженерний комплекс ГТС розглядаємо як відкриту термодинамічну систему, що складається із двох основних підсистем – споруд ГТС та акумульованого в них газу. До споруд ГТС відносимо складові системи, заповнені газом (трубопроводи, компресори, пласти підземних сховищ газу) та інші технологічні елементи. Взаємодія цих двох підсистем між собою та ГТС із довкіллям відбувається способом обміну між ними масою, імпульсом та енергією. ГТС, як фізичний об'єкт, являє собою нелінійну керовану динамічну систему з розподіленими параметрами, для якої характерні значні розміри та інерційність, дія розподілених і зосереджених керуючих впливів, значна невизначеність значень внутрішніх параметрів і зовнішніх чинників. Визначальними для функціонування системи є процеси перенесення маси, імпульсу та енергії газовими сумішами, силова та теплова взаємодія газу ГТС зі спорудами ГТС, обмін масою, імпульсом і енергією з довкіллям, процеси деформування, старіння та руйнування споруд тощо.

**У другому розділі** розглянуті математичні моделі, які описують структуру ГТС та процеси перенесення маси, імпульсу та енергії в магістральних газопроводах. Важливою складовою математично-алгоритмічного забезпечення системи автоматизації управління ГТС є модель її структури, яка є основою для побудови моделей транспортування та зберігання газу.

Модель структури необхідна для відображення конфігурації ГТС, технологічних, експлуатаційних та інших даних відповідно до потреб різних груп користувачів програмного комплексу. Також модель структури необхідна для розв'язування задач управління ГТС, як на технологічному й оперативному, так і на стратегічному рівнях. Це, зокрема: моделювання фізичних процесів у газі ГТС; моделювання фізико-механічних процесів у спорудах ГТС; керування конфігурацією ГТС та поточкорозподілом; керування перехідними режимами роботи ГТС;

ідентифікація параметрів моделей динаміки газу в ГТС; контроль цілісності, виявлення та ідентифікація витоків; відображення структури ГТС, властивостей її компонентів, вхідних даних і результатів розрахунків.

ГТС складається із технологічних об'єктів різного призначення – трубопроводів, КС, газовимірювальних станцій, запірно-регулювальної апаратури, труб-перемичок, вузлів розгалужень тощо. Течію газу через ці елементи описують рівняння динаміки газу, які включають у себе диференціальні рівняння перенесення маси, імпульсу та енергії, а також різні функціональні залежності, такі, як рівняння стану, функції, що визначають залежності фізичних властивостей газу від температури й тиску, тощо. Поділятимемо всі технологічні об'єкти лінійної частини ГТС на лінійні та вузлові елементи.

Лінійні елементи (ЛЕ) – це пасивні технологічні об'єкти. До них будемо відносити довгі трубопроводи. Кожен такий елемент створює розподілений гідравлічний опір, який, на загал, залежить від координати вздовж осі елемента і змінюється в часі. Процеси перенесення маси імпульсу та енергії в них описують істотно нелінійні диференціальні рівняння з частинними похідними, залежні від осьової координати та часової змінної. ЛЕ накопичують у своїх порожнинах значну масу газу, механічний імпульс, кінетичну, потенціальну та внутрішню енергії. Газ, що заповнює порожнини в лінійних елементах, є континуальною термодинамічною системою, яка взаємодіє зі стінками труби, якій властива значна інерційність.

Натомість, вузлові елементи (ВЕ) – об'єкти малої протяжності. До них будемо відносити кранові вузли, трійникові з'єднання, труби-перемички невеликої протяжності, вузли редукування газу тощо. Їхні внутрішні порожнини мають невеликий об'єм. Тому маса, імпульс та енергія газу, накопиченого в них, порівняно невеликі. Їхня інерційність мала. Їх можна розглядати як зосереджені елементи, які збурюють потік і створюють локальні гідравлічні опори. Перенесення маси, імпульсу й енергії газом, що перетікає через внутрішні порожнини вузлових елементів, можна описувати звичайними диференціальними рівняннями, залежними від часової змінної.

Нестационарний рух газу в трубопроводі описують рівняння з частинними похідними, які випливають із законів збереження маси, імпульсу та енергії. Якщо герметичність труби порушена то виникають витoki газу в зовнішнє середовище, які спричиняють відтік маси з труби та збурюють потік у деяких околах (рис. 1), внаслідок чого змінюються питомі імпульс і енергія потоку в зоні витoku.

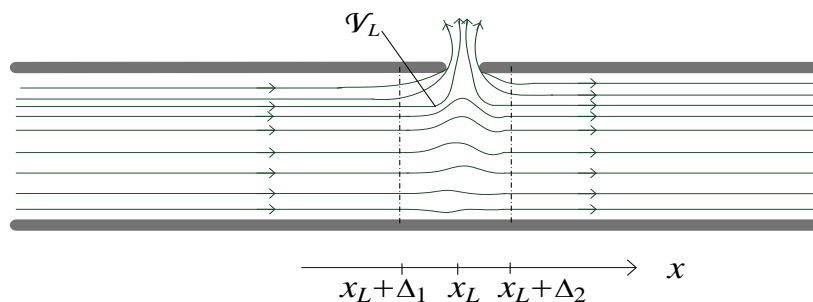


Рисунок 1- Збурення потоку в околі локального витoku

Оскільки відношення діаметра трубопроводу до його довжини є малий параметр, то нестационарні просторові розподіли тиску, густини, температури, швидкості руху матеріальних точок всередині труби та інших фізичних параметрів, що визначають течію, можна подати у вигляді відповідних залежностей за цими малими параметрами. У нульовому наближенні рух газу в трубі описують відповідні усереднені в поперечних перерізах параметри течії – швидкість  $-V$ , тиск  $-P$ , густина  $-D$  та температура  $-T$ .

За наявності витоків розроблена модель динаміки газу в довгих трубопроводах (лінійних елементах), яка має вигляд:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial \tau} &= -Ma \cdot \frac{\partial j}{\partial \xi} - Ma \cdot \rho l_M \\ \frac{\partial j}{\partial \tau} &= -2Ma \cdot \frac{j}{\rho} \frac{\partial j}{\partial \xi} - \left( Ma \cdot \frac{j^2}{\rho^2} + \frac{Z_t \theta}{Ma} \left( z + \rho \frac{\partial z}{\partial \rho} \right) \right) \frac{\partial \rho}{\partial \xi} - \frac{Z_t \rho}{Ma} \left( z + \theta \frac{\partial z}{\partial \theta} \right) \frac{\partial \theta}{\partial \xi} - Ma \cdot \beta |j| \frac{j}{\rho} - \\ &\quad - Ma \cdot l_M j - Ma \cdot \rho \frac{d\gamma}{d\xi} \\ \rho c_v \frac{\partial \theta}{\partial \tau} &= \frac{\partial}{\partial \xi} \left( \lambda_T \frac{\partial \theta}{\partial \xi} \right) - \rho c_v \frac{\partial \theta}{\partial \xi} - Ma \cdot \left( \frac{Z_t \theta}{Ma^2} \alpha z - b \frac{\theta^2}{\rho} \left( \frac{\partial z}{\partial \theta} \right)_\rho \right) \frac{\partial j}{\partial \xi} + \\ &\quad + Ma \cdot \theta \frac{j}{\rho} \left( \frac{Z_t}{Ma^2} \alpha z - b \frac{\theta}{\rho} \left( \frac{\partial z}{\partial \theta} \right)_\rho \right) \frac{\partial \rho}{\partial \xi} + Ma \cdot \alpha \left( \beta \frac{|j|j}{\rho^2} + \frac{d\gamma}{d\xi} \right) j + \\ &\quad + Ma \cdot b l_M \left( \frac{\partial z}{\partial \theta} \right)_\rho \theta^2 + \bar{h} (\theta_{env} - \theta) \end{aligned} \quad (1)$$

Де: густина  $\rho = D/D_t$ , масовий потік  $j = J/J_t$ , температура  $\theta = T/T_t$ , тиск  $p = P/P_t$  та швидкість  $v = V/V_t$ , розмірні параметри течії – густина  $D(x,t)$ , густина масового потоку  $J(x,t)$ , температура  $T(x,t)$ , тиск  $P(x,t)$ , швидкість руху  $V(x,t)$ ,  $L$  – довжина трубопроводу,  $Z$  – фактор стисливості,  $z = Z/Z_t$ ,  $D_t$ ,  $J_t$ ,  $T_t$ ,  $P_t$ ,  $Z_t$  та  $V_t$  – деякі характерні (типові) значення густини, масового потоку, температури, тиску, фактора стисливості та швидкості руху газу, характерний проміжок часу виберемо  $t_t = L/C_t$ , де  $C_t$  – швидкість звуку в газі за типових значень температури та густини, обчислена за моделлю ідеального газу (покладаючи  $Z = 1$ ), безрозмірна координата  $\xi = x/L_t$  та час  $\tau = t/t_t = t C_t/L_t$ ,  $\lambda_T = \Lambda/\Lambda_t$  – безрозмірний коефіцієнт теплопровідності газу,  $\Lambda_t = L_t D_t U_t C_t/T_t$  – характерне значення коефіцієнта теплопровідності,  $\alpha = V_t^2/U_t = 2 K_t/U_t$  – безрозмірний коефіцієнт, який визначає відношення характерного значення питомої кінетичної енергії  $K_t = 1/2 \cdot V_t^2$  до характерного значення питомої внутрішньої енергії,  $\beta = \lambda L_t/2D_{pipe}$ ,  $\bar{h} = 4 L_t/D_{pipe} \cdot h L_t/\Lambda_t$ ,  $\theta = T/T_t$  та  $\theta_{env} = T_{env}/T_t$  – безрозмірні температури газу та середовища,  $Ma = V_t/C_t$  – число

Маха,  $l_M = L_M L/V_t$ ,  $L_M$ -питома швидкість втрати маси газу,  $\bar{h} = 4L_t/D_{pipe} \cdot hL_t/\Lambda_t$ ,  $h = h(x)$  коефіцієнт теплообміну між газом у трубі й зовнішнім середовищем.

Також отримані моделі динаміки газу за відсутності витоків, модель за ізотермічного наближення та модель за стаціонарного режиму течії.

Сформульовані рівняння балансу маси та імпульсу газу для вузлових елементів, утворених з'єднанням труб різних та однакових діаметрів, утворених розгалуженням та злиттям потоків.

Розглянута модель локального витоку, яка визначає об'ємні втрати маси, імпульсу та енергії потоку газу в трубі внаслідок його витікання через наскрізний отвір, який утворився в стінці труби. Витікання збурює потік на відрізьку труби довжиною  $\Delta_x \equiv \Delta_1 + \Delta_2$  в околі місця  $x_L$  розгерметизації.

Для визначення густини квазіусталеного потоку маси через малий дефект у стінці труби отримана формула

$$J_{steady} = D_L C_t \sqrt{2Z_L \frac{\kappa_L}{\kappa_L - 1} \left( \psi^{2/\kappa_L} - \psi^{(\kappa_L + 1)/\kappa_L} \right)}. \quad (2)$$

Тут  $\kappa_L = \kappa_g(D_L, T_L)$  – значення показника ізоентропи газу в місці розгерметизації. Формула (2) отримана за припущення, що процес витікання газу є ізоентропійний. Потік витоку за цією формулою залежить від відношення  $\psi = P'/P_L$  тиску в середовищі, у яке газ витікає до тиску газу в трубі в місці розгерметизації. Зі зменшенням цієї величини швидкість  $V'$  руху газу через отвір, і потік  $J_{steady}$  зростають. У разі малих отворів і за досить високого тиску газу в трубопроводі потік  $J_{steady}$  не залежить від тиску  $P'$  у зовнішньому середовищі, а визначається лише параметрами стану газу в трубі в околі місця розгерметизації.

Для моделювання нестационарної течії газу в МГ розглядали його як лінійну структуру секцій ЛЧ, поєднаних КС, а кожну секцію як систему ЛЕ, послідовно з'єднаних між собою ВЕ (рис. 2).

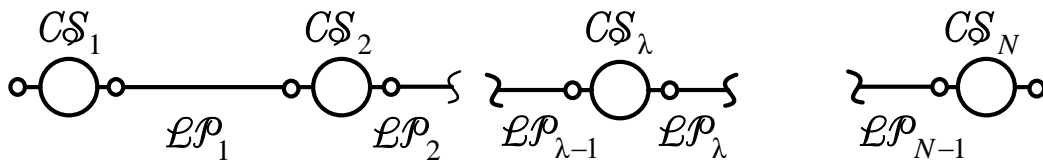


Рисунок 2 - Структура магістрального газопроводу, де  $CS_\lambda, \lambda = 1, 2, \dots, N$  – компресорні станції,  $LP_\lambda, \lambda = 1, 2, \dots, N - 1$  – секції лінійної частини

Вважали, що на вході та виході кожної КС здійснюється моніторинг тиску, температури та витрати (чи швидкості руху) газу. На основі цих даних можна розрахувати відповідні емпіричні функції, які визначають крайові умови для задач моделювання нестационарної течії газу в кожній секції. Це дало змогу звести опис течії газу в МГ до опису течії в усіх його секціях.

Побудована узагальнена математична модель для опису течії газу в секції МГ за перехідних режимів його експлуатації. Вона містить системи рівнянь динаміки для

всіх ЛЕ і ВЕ, умови спряження ключових функцій, початкові та крайові умови, визначені з використанням емпіричних функцій. Розглянуто також спрощений варіант моделі, у якому не врахована інерційність мас газу, накопичених у внутрішніх порожнинах ВЕ. Це дало змогу вилучити із моделі структури секції ВЕ, а з математичної моделі течії – звичайні диференціальні рівняння, замінивши їх скінченними співвідношеннями, які враховують гідравлічний опір ВЕ.

Для секцій, лінійні елементи яких є відрізками труб одного діаметра, запропонований підхід, який істотно спрощує математичну модель для опису течії газу в секції. Підхід базується на моделі віртуального вузлового елемента. За цим підходом ВЕ в моделі структури секції замінюємо відрізками труб, такого ж діаметра, як і ЛЕ секції. Довжину й коефіцієнт гідравлічного опору віртуального ВЕ вибрано так, щоб його об'єм і гідравлічний опір дорівнювали відповідним значенням цих параметрів реального ВЕ. Це дало змогу звести математичну модель течії в секції до сукупності трьох рівнянь із частинними похідними, які описують перенесення маси, імпульсу та тепла у віртуальній секції, та крайових умов, визначених із використанням емпіричних функцій.

Розроблені в розділі математичні моделі формують теоретичну основу й математичний апарат для технологічних задач керування потоками газу в МГ, як-от ідентифікація параметрів математичних моделей ЛЕ і ВЕ, числове моделювання, планування та оптимізація стаціонарних і перехідних режимів роботи МГ, балансування маси газу, виявлення витоків та контроль цілісності ЛЧ МГ, оптимізація структури ГТС тощо.

**У третьому розділі** розроблені ітераційні методи розв'язування задач моделювання процесів перенесення маси, імпульсу та енергії в МГ.

Розглянуто довгий газопровід довжиною  $L$ , профіль осі якої у вертикальній площині визначає задана функція  $H(x)$ , залежна від координати  $x$  вздовж траси газопроводу. Також задана функція  $\lambda(x)$ , яка визначає залежність коефіцієнта гідравлічного опору в трубі від координати  $x$ . Вона описує залежність коефіцієнта гідравлічного опору  $\lambda$  від координати і враховує додаткові гідравлічні опори, які виникають на криволінійних ділянках траси. Вважатимемо також, що відома функція  $T_{env}(x)$ , яка визначає розподіл вздовж траси температури  $T_{env}$  середовища, у якому пролягає трубопровід, термічне рівняння стану, яке визначає залежність коефіцієнта надстисливості газу  $Z$  від його температури  $T$  та густини  $D$ , калоричне рівняння стану, яке визначає теплоємність газу  $C_v(T, D)$ .

У перехідних режимах течії процеси перенесення маси, імпульсу та енергії газом, що протікає в трубі, за відсутності витоків визначають три диференціальні рівняння з частинними похідними, які запишемо у вигляді:

$$\begin{aligned} \mathcal{PDE}_\rho(\rho, j): \quad & \frac{\partial \rho}{\partial \tau} = \mathcal{L}_\rho(j), \\ \mathcal{PDE}_j(\rho, j, \theta): \quad & \frac{\partial j}{\partial \tau} = \mathcal{L}_j(\rho, j, \theta) + f_j(\rho, j), \\ \mathcal{PDE}_\theta(\rho, j, \theta): \quad & \frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \mathcal{L}_\theta(\rho, j, \theta) + f_\theta(\rho, j, \theta) \end{aligned} \quad (3)$$

де  $\rho = \rho(\xi, \tau)$ ,  $j = j(\xi, \tau)$  та  $\theta = \theta(\xi, \tau)$  – ключові функції, за які вибрані безрозмірні густина  $\rho$ , густина масового потоку  $j$  та температура газу  $\theta$ ;  $\xi$  та  $\tau$  – безрозмірні координата  $\xi \in (0,1)$  та час  $\tau \geq 0$ ;  $\mathcal{L}_\rho(j)$  – лінійний диференціальний оператор, залежний від  $\partial j / \partial \xi$ ;  $\mathcal{L}_j(\rho, j, \theta)$ , – нелінійний диференціальний оператор, залежний від перших похідних ключових функцій  $\rho, j, \theta$  за змінною  $x$  та від самих цих функцій;  $\mathcal{L}_\theta(\rho, j, \theta)$  – нелінійний диференціальний оператор, залежний від перших похідних за просторовою координатою від  $\rho, j$  та  $\theta$ , другої похідної від функції  $\theta$ , а також від самих ключових функцій  $\rho, j, \theta$ ;  $f_j(\rho, j)$  та  $f_\theta(\rho, j, \theta)$  – нелінійні функції. Ключові функції  $\rho = \rho(\xi, \tau)$ ,  $j = j(\xi, \tau)$  та  $\theta = \theta(\xi, \tau)$ , які задовольняють систему (3) у відкритому відрізку  $\xi \in (0,1)$ , на кінцях цього відрізка  $\xi = 0$  та  $\xi = 1$  треба підпорядкувати певним крайовим умовам.

У роботі розглянуті такі типи крайових умов і відповідно крайових задач моделювання перехідних процесів у секції.

1. На вході та виході секції задані густина  $\rho_\lambda^{in}(\tau)$  та  $\rho_\lambda^{out}(\tau)$  і температура  $\theta_\lambda^{in}(\tau)$  та  $\theta_\lambda^{out}(\tau)$  як функції часу.
2. На вході секції задані безрозмірні густина  $\rho_\lambda^{in}(\tau)$  і температура  $\theta_\lambda^{in}(\tau)$ , а на виході – безрозмірний потік маси  $j_\lambda^{out}(\tau)$  і температура  $\theta_\lambda^{out}(\tau)$ .
3. На вході секції задані безрозмірний потік маси  $j_\lambda^{in}(\tau)$  і температура  $\theta_\lambda^{in}(\tau)$ , а на виході – густина  $\rho_\lambda^{out}(\tau)$  і температура  $\theta_\lambda^{out}(\tau)$ .
4. На вході секції задані безрозмірний потік механічної потужності  $w_\lambda^{in}(\tau) = p_\lambda^{in}(\tau) v_\lambda^{in}(\tau)$ , яку компресорна станція  $CS_\lambda$  передає потокові, і температура  $\theta_\lambda^{in}(\tau)$ , а на виході густина  $\rho_\lambda^{out}(\tau)$  і температура  $\theta_\lambda^{out}(\tau)$ .
5. На вході секції задані безрозмірна густина  $\rho^{in}(\tau)$  і температура  $\theta_\lambda^{in}(\tau)$ , а на виході потік механічної потужності  $w_\lambda^{out}(\tau)$ ,  $j_\lambda^{out}(\tau)$  і температура  $\theta_\lambda^{out}(\tau)$ .

Крайові умови визначають значення відповідних параметрів на вході першого вузлового елемента секції та на виході останнього.

Як, зазначалося раніше, температура  $T$  газу в трубі помітно відрізняється від температури середовища лише на ділянках трубопроводу (лінійних елементах), що безпосередньо з'єднані із виходами компресорних станцій. На інших ділянках вплив варіацій температури газу на нестационарні розподіли тиску й масового потоку газу в трубопроводі є малий. Тому шукатимемо наближені розв'язки задач, використовуючи такий ітераційний процес, який утворимо на основі системи (3)



$$\begin{aligned}
\mathcal{PDE}_\rho(\rho^{(k)}, j^{(k)}) &: \quad \frac{\partial \rho^{(k)}}{\partial \tau} = \mathcal{L}_\rho(j^{(k)}), \\
\mathcal{PDE}_j(\rho^{(k)}, j^{(k)}) &: \quad \frac{\partial j}{\partial \tau} = \mathcal{L}_j(\rho^{(k)}, j^{(k)}, \theta^{(k-1)}) + f_j(\rho^{(k)}, j^{(k)}), \\
\mathcal{PDE}_\theta(\theta^{(k)}) &: \quad \frac{\partial \theta^{(k)}}{\partial \tau} = \mathcal{L}_\theta(\rho^{(k)}, j^{(k)}, \theta^{(k)}) + f_\theta(\rho^{(k)}, j^{(k)}, \theta^{(k)})
\end{aligned} \tag{4}$$

де верхній індекс у дужках визначає номер ітерації.

Розглянуто керування режимами роботи МГ, яке відбувається способом зміни режимів роботи КС. Так, збільшення швидкості обертання нагнітачів спричиняє збільшення механічної потужності, яку КС передає потоку газу. Внаслідок цього зростає значення масового потоку на вході секції, з'єднаної із виходом КС та на виході секції, яка з'єднана з її входом. Частина енергії, яку споживає КС із зовнішніх джерел, перетворюється в тепло, яке нагріває транспортований газ і частково розсіюється в довкіллі.

Отже, наявний взаємозв'язок між режимами роботи компресорної станції й параметрами газового потоку (масовий потік, тиск, температура) газу на вході і виході компресорної станції. У роботі вважаємо, що відомі залежні від часу значення тиску, температури і швидкості потоку (масової витрати) на входах і виходах усіх компресорних станцій, які отримані способом вимірювань. Як показано в попередніх двох розділах, на основі таких емпіричних даних можна обчислити безрозмірні функції  $\rho^{in/out}(\tau)$ ,  $j^{in/out}(\tau)$ ,  $\theta^{in/out}(\tau)$  та  $w^{in/out}(\tau)$ . Вони визначають крайові умови у відповідних рівняннях перенесення маси імпульсу та енергії, тобто є зовнішніми функціями – або функціями (чи параметрами) керування – у математичних моделях для опису процесів транспортування газу в МГ.

У рамках запропонованих математичних моделей перехідний процес МГ зі стаціонарного  $Stationar_1$  режиму в інший стаціонарний режим  $Stationar_2$  визначають три внутрішні функції  $\rho(\xi, \tau)$ ,  $j(\xi, \tau)$  та  $\theta(\xi, \tau)$ . Їх можна встановити, розв'язавши відповідну задачу  $\mathcal{BVP}_K$ ,  $K = I, \dots, V$ , яку називаємо моделлю керування перехідним процесом  $Transient_{1-2}$ . Тут нижні індекси вказують на стаціонарні режими, між якими відбувається перехід, та напрям такого переходу. Модель керування  $\mathcal{BVP}_K$  залежить від чотирьох функцій керування. Їхню множину  $\Psi_K(\tau)$  утворюють функції крайових умов  $\mathcal{BC}_K$ . Згідно з моделями кожна із функцій керування  $\psi(\tau) \in \Psi_K(\tau)$  залежить, від чотирьох параметрів. Тож, множина  $\Pi_K$  параметрів керування для моделі  $\mathcal{BVP}_K$  містить 16 параметрів.

Алгоритм керування перехідним процесом визначається вибором моделі керування  $\mathcal{BVP}_K$  та конкретних значень параметрів керування  $\Pi_K$ , властивих для цієї моделі.

У розділі проведено дослідження трьох моделей керування перехідними процесами за ізотермічного наближення. Кожній моделі відповідає певна крайова задача для рівнянь динаміки газу в довгому трубопроводі.

Дослідження перехідних процесів для моделей управління  $\mathcal{BVP}_I, \dots, \mathcal{BVP}_{III}$  проведено з використанням моделі функцій керування. За цією моделлю будь-яку з чотирьох функцій керування, цілком визначають чотири дійсні числа – два значення контрольованого параметра, які відповідають стаціонарним режимам  $Stationar_1$  та  $Stationar_2$ , а також два часові параметри – моменти початку  $\tau_{start}^\Psi$  і завершення  $\tau_{end}^\Psi$  зміни функції керування. Вибором параметрів  $\tau_{start}^\Psi$  і  $\tau_{end}^\Psi$  можна визначати швидкість зміни цієї функції, а також змінювати часовий зсув між функціями керування, що діють на вході та виході трубопроводу.

Результати проведених числових експериментів, можна використати, щоб керувати параметрами перехідного процесу, як-от його тривалість  $\tau_{gr}$ , питома механічна робота, затрачена на відбір газу із ГТС тощо. У рамках нелінійної моделі динаміки газу в довгому трубопроводі сформульовані дві задачі оптимального керування стаціонарними потоками транспортування газу МГ, запропонований метод для їхнього числового розв'язування. Їх можна використати для керування стаціонарними режимами роботи магістральних газопроводів.

**Четвертий розділ** присвячений математичному моделюванню малих збурень потоку газу. У потоці газу в трубі МГ, як у стаціонарних, так нестационарних режимах їхньої експлуатації можуть виникати малі збурення тиску та витрати. Їх зумовлюють нестабільності роботи компресорів, локальні варіації гідравлічного опору, теплові флуктуації тощо. Причиною виникнення збурень може бути також і раптове падіння тиску в місці локальної розгерметизації.

Для математичного опису малих збурень розглянемо секцію лінійної частини МГ як довгий трубопровід, виготовлений із труб одного діаметра. За ізотермічного наближення рух газу в ній описує нелінійна система рівнянь із частинними похідними, яка за відсутності витоків матиме вигляд

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} = -Ma \frac{\partial j}{\partial \xi}, \quad (5)$$

$$\frac{\partial j}{\partial \tau} + \frac{1}{Ma} \left( a^2 - Ma^2 \frac{j^2}{\rho^2} \right) \frac{\partial \rho}{\partial \xi} + 2Ma \frac{j}{\rho} \frac{\partial j}{\partial \xi} + \beta Ma \frac{j|j|}{\rho} + Ma \frac{\partial \gamma}{\partial \xi} \rho = 0. \quad (6)$$

Тут  $a \equiv \left( z + \rho \frac{\partial z}{\partial \rho} \right) / c_t = a(\xi, \tau)$ .

Нехай на початковий нестационарний стан, який визначається функціями  $\rho_0(\xi, \tau)$ ,  $j_0(\xi, \tau)$  накладається мале збурення  $\tilde{\rho}(\xi, \tau)$ ,  $\tilde{j}(\xi, \tau)$ . Збурений стан визначають функції

$$\rho(\xi, \tau) = \rho_0(\xi, \tau) + \tilde{\rho}(\xi, \tau), \quad j(\xi, \tau) = j_0(\xi, \tau) + \tilde{j}(\xi, \tau) \quad (7)$$

Обидві пари функцій  $\rho_0(\xi, \tau)$ ,  $j_0(\xi, \tau)$  і  $\rho(\xi, \tau)$ ,  $j(\xi, \tau)$  задовольняють систему (8), (9). З огляду на це та зважаючи на малість збурення  $\tilde{\rho}(\xi, \tau)$  і  $\tilde{j}(\xi, \tau)$ , встановимо рівняння для збурення  $\tilde{\rho}(\xi, \tau)$ ,  $\tilde{j}(\xi, \tau)$ .

Оскільки рівняння (5) лінійне, збурення  $\tilde{\rho}(\xi, \tau)$ ,  $\tilde{j}(\xi, \tau)$  задовольняє його точно:

$$\frac{\partial \tilde{\rho}}{\partial \tau} + Ma \frac{\partial \tilde{j}}{\partial \xi} = 0. \quad (8)$$

Підставляючи (8) у рівняння (5–6) та нехтуючи нелінійними стосовно функцій  $\tilde{\rho}$ ,  $\tilde{j}$  членами та їхніми похідними, отримаємо

$$\begin{aligned} \frac{\partial \tilde{j}}{\partial \tau} + \frac{1}{Ma} (a_0^2 - Ma^2 v_0^2) \frac{\partial \tilde{\rho}}{\partial \xi} + 2Ma v_0 \frac{\partial \tilde{j}}{\partial \xi} + 2Ma \left( \frac{\partial v_0}{\partial \xi} + \beta v_0 \right) \tilde{j} + \\ + \frac{1}{Ma} \left( \frac{\partial a_0^2}{\partial \xi} - Ma^2 \frac{\partial v_0^2}{\partial \xi} - Ma^2 \cdot \beta v_0^2 + Ma^2 \cdot \frac{\partial \gamma}{\partial \xi} \right) \tilde{\rho}. \end{aligned} \quad (9)$$

Де  $a_0(\xi, \tau)$  - швидкість звуку в газі та  $v_0(\xi, \tau) = j_0(\xi, \tau) / \omega_0(\xi, \tau)$  швидкість його руху. Система (8), (9) визначає математичну модель поширення малих збурень густини в нестационарному потоці газу. У цьому розділі досліджено коефіцієнти системи (8), (9), які описують хвилі збурень, залежно від режиму стаціонарної течії газу в трубі, у якій вони поширюються.

Розглядали горизонтальний трубопровід ( $\gamma = 0$ ) з коефіцієнтом  $\lambda = 0.0092$  діаметром  $D_t = 1.338$  м, довжиною  $L = 120$  км. Результати досліджень наведені на рисунках 3 -5. Криві 1, 2, 3 відповідають значенням потоку  $j_0 = 0.6, 0.8, 0.9$ .

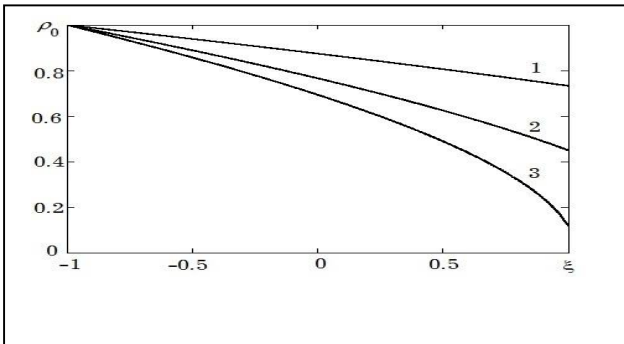


Рисунок 3 - Розподіл густини газу в трубопроводі за різних режимів стаціонарної течії

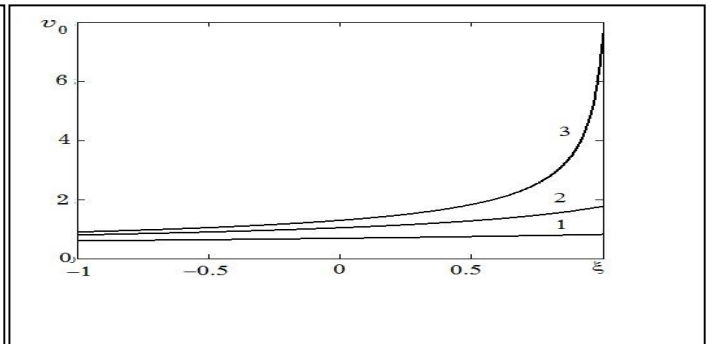


Рисунок 4 - Розподіл швидкості руху газу в трубопроводі за різних режимів стаціонарної течії

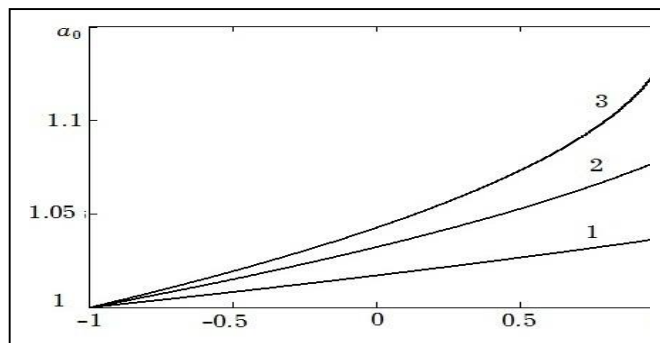


Рисунок 5 - Координатні залежності швидкості звуку в газі, обчислені для трьох різних режимів стаціонарної течії в трубопроводі

Кількісні дослідження малого збурення в стаціонарному потоці газу провели способом розв'язування задачі Коші для системи (8), (9). Виникнення збурення моделювали початковими умовами виду

$$\tilde{\rho}|_{\tau=0} = \varphi(\xi - \xi_0), \quad \tilde{j}|_{\tau=0} = 0, \quad (10)$$

де  $\varphi(\xi)$  – функція, визначена в малому околі  $[-d, d]$ ,  $0 < d = 1$ ,  $\xi_0 \in (-1, 1)$ .

Збурення не впливає на режими компресорних станцій, тому задавали однорідні граничні умови:

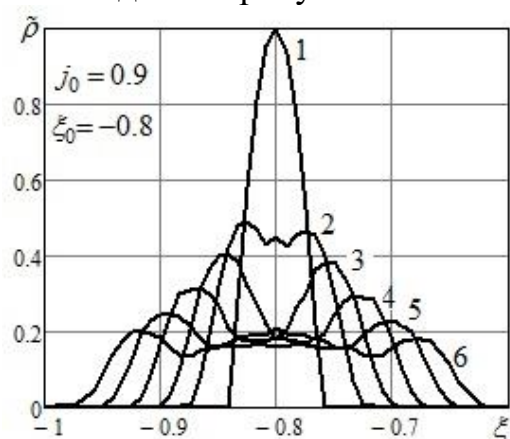
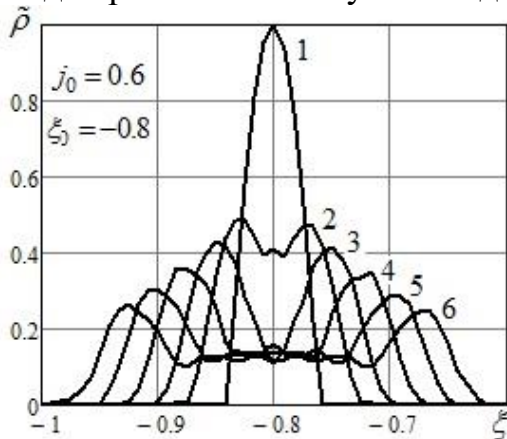
$$\tilde{\rho}|_{\xi=\pm 1} = 0. \quad (11)$$

Використовуючи метод скінченних різниць, зводили сформульовану задачу до задачі Коші для системи залежних від часу  $\tau$  звичайних диференціальних рівнянь першого порядку щодо вузлових значень густини  $\tilde{\rho}_i(\tau) = \tilde{\rho}(\xi_i, \tau)$  і потоку  $\tilde{j}_i(\tau) = \tilde{j}(\xi_i, \tau)$ , визначених на одновимірній сітці  $X = \{\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n\}$ , де  $n$  – кількість вузлів сітки. Цю задачу розв'язували, застосовуючи алгоритм RKF-45.

Провели кількісні дослідження поширення й загасання флуктуації тиску, що виникає у вигляді поодинокого імпульсу в деякій точці  $\xi_0$  трубопроводу. Флуктуацію визначали функцією початкових умов виду

$$\varphi(x) = \begin{cases} \cos\left(\frac{\pi(\xi - \xi_0)}{2d}\right), & \xi_0 - d/2 \leq \xi \leq \xi_0 + d/2 \\ 0, & (-1 < \xi < \xi_0 - d/2) \vee (\xi_0 + d/2 < \xi) \end{cases}. \quad (12)$$

Дослідження провели для двох різних режимів стаціонарної течії, які визначали значенням  $j_0 = 0.6$  (низький рівень завантаження трубопроводу) та  $j_0 = 0.9$  (високий рівень завантаження). Безрозмірну густину газу на вході в обох випадках брали однакою  $\rho_0^m = 1.0$ . За значення  $j_0 = 0.9$ , у трубопроводі реалізується режим течії, близький до критичного. Результати досліджень наведені на рисунках 6–7.



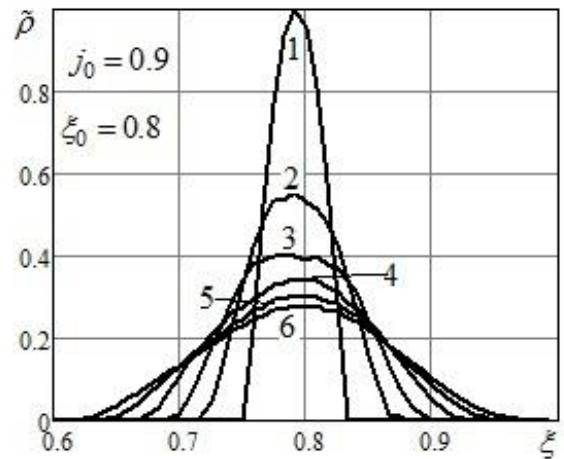
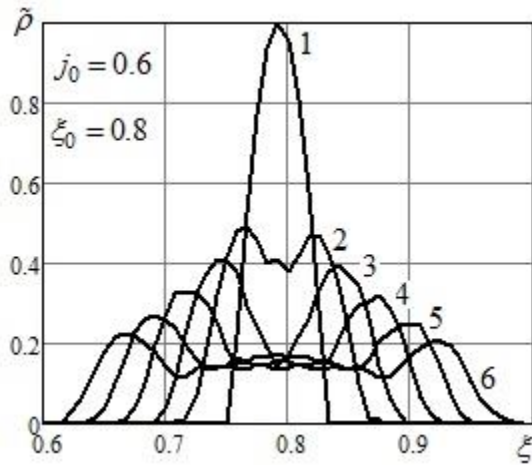


Рисунок 6 - Розподіли густини  $\tilde{\rho}(\xi, \tau)$  у фіксовані моменти часу  $\tau = 0, 0.067, 0.13, 0.20, 0.27, 0.33$  (криві 1 – 6) залежно від координати  $\xi_0$  місця її виникнення та величини стаціонарного масового потоку газу в трубі

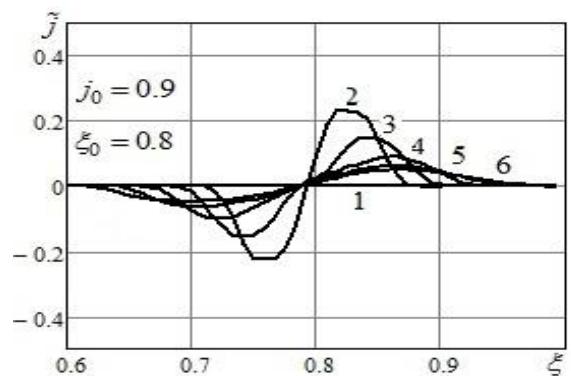
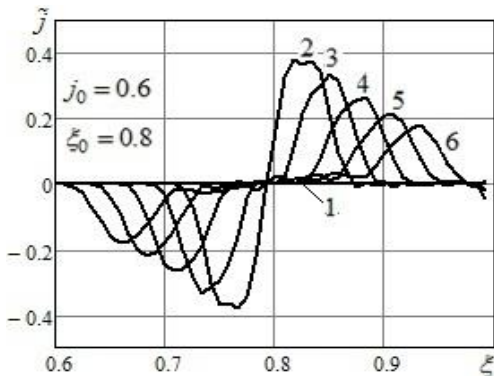
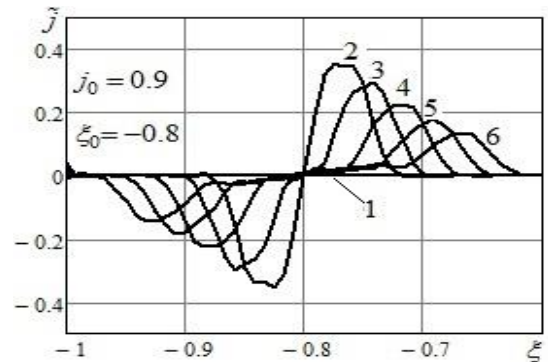
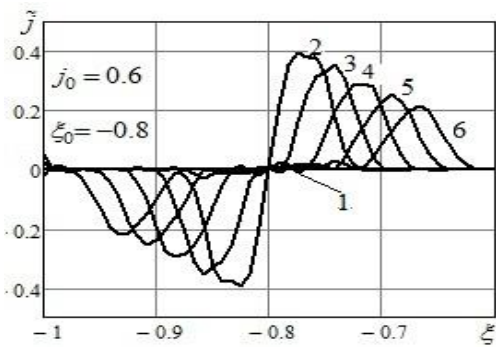


Рисунок 7 - Розподіли густини потоку  $\tilde{j}(\xi, \tau)$  у фіксовані моменти часу  $\tau = 0, 0.067, 0.13, 0.20, 0.27, 0.33$  (криві 1 – 6) залежно від координати  $\xi_0$  місця її виникнення та величини  $j_0$  стаціонарного масового потоку газу в трубі

Проведено також дослідження поширення малих збурень тиску, спричинених імпульсною флуктуацією, що виникла на вході трубопроводу. З цією метою розглянули задачу для системи (8), (9) з однорідними початковими умовами

$$\tilde{\rho}|_{\tau=0} = 0, \quad \tilde{j}|_{\tau=0} = 0 \quad (13)$$

та крайовими умовами виду

$$\tilde{\rho}|_{\xi=-1} = \varphi(\tau), \quad \tilde{\rho}|_{\xi=1} = 0, \quad (14)$$

де  $\varphi(\tau)$  – функція, яка визначає форму імпульсу збурення в початковий момент часу, яку брали у вигляді

$$\varphi(\tau) = \begin{cases} \cos\left(\frac{\pi\tau}{2d}\right), & 0 < \tau \leq d \\ 0, & \tau > d \end{cases} \quad (15)$$

На рисунку 8 показані розподіли густини  $\tilde{\rho}(\xi, \tau)$  і потоку  $\tilde{j}(\xi, \tau)$  збурення від координати  $\xi$ , обчислені в моменти часу  $\tau = 0.067, 0.13, 0.20, 0.27, 0.33, 0.47, 0.60, 0.80$  (криві 1 – 8 відповідно) для  $d = 0.05$ ,  $j_0 = 0.6$ .

Як бачимо, збурення практично загасає на відстані 0.3...0.4. В околі горизонтальної осі на рисунках 8, 9 спостерігаються невеликі імпульси. Це хвилі, відбиті від краю  $\xi = -1$ .

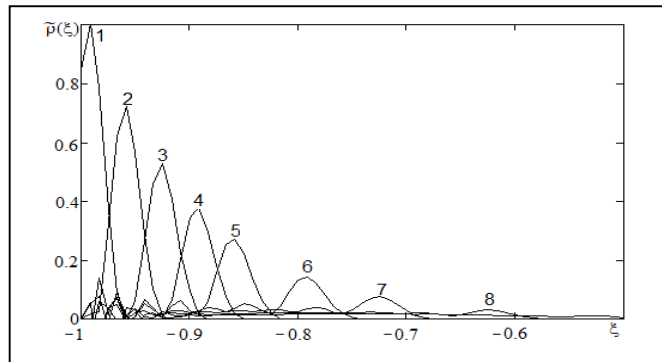


Рисунок 8 - Розподіли густини  $\tilde{\rho}(\xi, \tau)$  збурення, обчислені в різні моменти часу

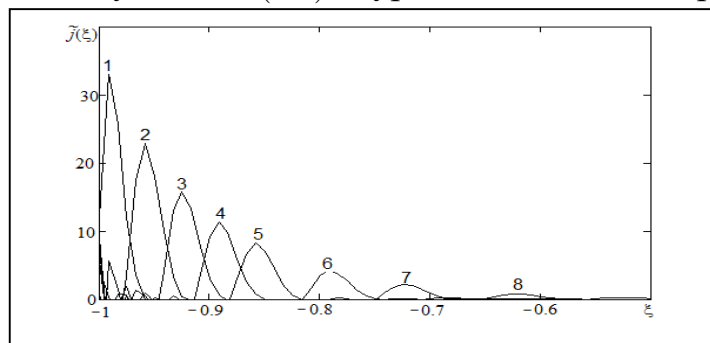


Рисунок 9 - Розподіли густини масового потоку  $\tilde{j}(\xi, \tau)$  збурення, обчислені в різні моменти часу

Розроблена математична модель поширення малих збурень у потоці газу трубопроводу. У рамках моделі сформульована задача визначення хвильового поля збурення, спричиненого локальною флуктуацією тиску та розроблена методика її числового розв'язування із використанням методу скінченних різниць. Проведені дослідження хвильового поля залежно від місця виникнення флуктуації та режиму течії.

Встановлено, що імпульси збурення досить швидко згасають. Швидкість загасання імпульсів зростає із наближенням місця виникнення флуктуації до виходу трубопроводу. За режимів, близьких до критичного, картина хвильового поля збурення сильно залежить від місця виникнення флуктуації. Якщо флуктуація виникає поблизу входу трубопроводу чи в його центральній частині (далеко від виходу), то чітко спостерігаються два імпульси, що рухаються, загасаючи на своєму шляху, у протилежних напрямках із різними груповими швидкостями. Якщо ж флуктуація виникає досить близько до виходу, то картина поля «розмивається» й більше нагадує не хвильовий, а дифузійний процес. Побудована математична модель і результати проведених кількісних досліджень можна використати для розроблення методів виявлення витоків, які базуються на реєстрації хвиль тиску, які виникають у трубопроводі за раптової локальної розгерметизації.

У п'ятому розділі наведені розроблені математичні моделі та методи для контролю цілісності лінійної частини магістрального газопроводу. Неконтрольована розгерметизація трубопроводу створює аварійно-небезпечні ситуації, екологічні загрози й може призводити до значних економічних втрат. Проблема виявлення витоків природного газу з магістральних газопроводів є актуальною для України, оскільки методи й засоби контролю, які застосовують у газовій галузі, не задовольняють сучасні вимоги. Методи виявлення витоків можна класифікувати за різними ознаками – за фізичними принципами функціонування (акустичні, оптичні, радіолокаційні, ПЧ-радіометричні), за характером даних, які ці системи використовують (неперервні, дискретні), за способами відбору цих даних та алгоритмами їхнього оброблення, за ступенем автоматизації процесів відбору даних тощо.

Розглядатимемо магістральний газопровід, який працює в стаціонарному режимі як лінійну структуру, що складається з  $N$  однотипних довгих циліндричних трубопроводів (секцій) і  $N + 1$  вузлів. Серед них два зовнішніх вузли (вхід та вихід) та  $N - 1$  внутрішні, які представляють компресорні станції.

Режим роботи трубопроводу характеризується значеннями вхідних і вихідних тисків  $P^{(in)}$  і  $P^{(out)}$  та масових потоків  $J^{(in)}$  і  $J^{(out)}$ , розподілами тиску  $P_l$  та масового потоку  $J_l$ ,  $l = 1, 2, \dots, N$  в секціях, масовими потоками  $J_k^{(cs)}$ ,  $k = 1, 2, \dots, N - 1$ , які споживають компресорні станції.

Виходитимемо із того, що під час експлуатації магістрального газопроводу здійснюється неперервний контроль вхідних і вихідних тисків  $P^{(in)}$  і  $P^{(out)}$  та потоків  $J^{(in)}$  і  $J^{(out)}$ , вхідних  $P_l^{(in)}$  та вихідних  $P_l^{(out)}$  тисків на кожній секції, тисків  $P_j^{(k)}$ ,  $k = 1, 2, \dots, N_l$  в проміжних контрольних точках, розташованих вздовж кожної

секції на відстанях  $L_l^{(k)}$  від її початку, дані про масові витрати газу  $J_k^{(cs)}$ , які споживають компресорні станції, а також абсолютні  $\varepsilon_p$  і  $\varepsilon_j$  та відносні  $\delta_p$  і  $\delta_j$  похибки вимірювань тиску  $P$  і масової витрати  $J$ .

За стаціонарного режиму роботи магістралі повинна виконуватися умова

$$J^{(in)} = J^{(out)} + \sum_{k=1}^N J_k^{(cs)}, \quad (16)$$

яка виражає закон збереження маси. Застосування цього закону для кожної окремої секції приводить до співвідношення

$$J_l^{(in)} = J_l^{(out)}, \quad l = 1, 2, \dots, N \quad (17)$$

Оскільки значення масових потоків відомі з певною точністю, то співвідношення (16), (17) виконуються лише наближено. Тому подаємо їх у вигляді

$$\left| J^{(in)} - J^{(out)} - \sum_{k=1}^N J_k^{(cs)} \right| \leq \varepsilon_T \quad (18)$$

$$\left| J_l^{(in)} - J_l^{(out)} \right| \leq \varepsilon_l, \quad l = 1, 2, \dots, N. \quad (19)$$

Тут  $\varepsilon_T$  та  $\varepsilon_l$  деякі малі порівнюючи з потоками  $J_k^{(cs)}$ ,  $J_l^{(out)}$  величини.

Співвідношення (18), (19) використовуються для виявлення витоків. Для кількісного оцінювання  $\varepsilon_T$  та  $\varepsilon_l$  необхідно враховувати характеристики приладів для вимірювання тиску та витрати газу в газопроводах високого тиску.

У стаціонарних режимах експлуатації МГ система рівнянь динаміки газу за наявності витoku матиме вигляд:

$$\frac{dj}{d\xi} + \hat{l}_M = 0, \quad (20)$$

$$\frac{d}{d\xi} \left( \frac{j^2}{\rho} + \frac{1}{Ma^2} z \theta \rho \right) + \beta \frac{j^2}{\rho} + \hat{l}_M \frac{j}{\rho} + \rho \frac{d\gamma}{d\xi} = 0. \quad (21)$$

З рівняння (17) випливає, що

$$j(\xi) = j^{in} - j_M(\xi), \quad j_M(\xi) \equiv \int_0^\xi \hat{l}_M d\xi,$$

де  $j^{in}$  – значення безрозмірної густини масового потоку на вході,  $j_M$  – безрозмірна густина масового потоку, що витікає через негерметичну стінку труби.

З урахуванням (20) зводимо рівняння (21) до вигляду

$$\frac{d\rho}{d\xi} = -Ma^2 \rho \frac{\beta j^2 + \frac{\partial j^2}{\partial \xi} + \hat{l}_M j + \rho^2 \frac{d\gamma}{d\xi}}{\theta \rho^2 \left( z + \rho \frac{\partial z}{\partial \rho} \right) - Ma^2 j^2}. \quad (22)$$



Отримали диференціальне рівняння першого порядку щодо функції  $\rho(\xi)$ , яка визначає розподіл густини газу за стаціонарної течії. Права частина цього рівняння визначена, якщо заданий потік  $j^{in}$  і функція витoku  $l_M = l_M(\xi)$ .

Якщо витік спричинений локальною розгерметизацією, то рівняння (22) матиме вигляд

$$\frac{\partial \rho}{\partial \xi} = - \frac{Ma^2 \beta j^2 \rho (1 - \eta(2 - \eta)) H(\xi - \xi_0) + Ma \frac{\partial \gamma}{\partial \xi} \rho^3}{Z(\tilde{\rho}) \rho^2 - Ma^2 j^2 (1 - \eta(2 - \eta)) H(\xi - \xi_0)}. \quad (23)$$

Тут  $H(\xi)$  – одинична функція Гевісайда,  $\xi_0$  – безрозмірна координата місця витoku,  $\eta$  – інтенсивність витoku:

$$\eta \equiv (J^{(in)} - J^{out}) / J^{(in)} = \rho_L K_L, \quad (24)$$

де  $\rho_L$  – густина газу в місці локальної розгерметизації,  $K_L$  – коефіцієнт витoku.

За заданого  $j$  можна розглядати дві крайові задачі – перша, коли задано тиск на вході, а друга, коли задано тиск на виході секції. Відповідно до цього матимемо дві крайові умови

$$\rho|_{\xi=-1} = \rho^{(in)}, \quad (25)$$

$$\rho|_{\xi=1} = \rho^{(out)}, \quad (26)$$

де  $\rho^{(in)}$  і  $\rho^{(out)}$  задані безрозмірні значення густини на вході і виході  $\rho^{(in)} > \rho^{(out)}$ .

Використовуючи умови (25) та (26), можна сформулювати дві задачі Коші – (23), (25) (**IVP<sub>I</sub>**) та (23), (26) (**IVP<sub>II</sub>**), які відповідають двом моделям керування стаціонарним режимом течії газу в трубопроводі з локальним витокom. За першою стаціонарний режим задають значеннями густини масового потоку  $J^{in}$  та тиску  $P^{in}$  на вході, а за другою – потоку  $J^{out}$  та тиску  $P^{out}$  на виході. Крім задач **IVP<sub>I</sub>** та **IVP<sub>II</sub>**, розглядатимемо задачу **IVP<sub>III</sub>**, у якій задані обидві умови (25) і (26), але густина потоку  $j$  невідома. За її розв'язком можна визначити невідому густину потоку  $J$ , якщо відомі значення тиску на вході  $P^{(in)}$  і виході  $P^{(in)}$ .

Щоб оцінити інформативні параметри для задач виявлення витoku, необхідно дослідити стаціонарну течію газу в трубопроводі залежно від координати витoku  $\xi_L$ . Для цього застосували модель **IVP<sub>I</sub>**, у якій параметрами керування є потік  $j^{in}$  і густина  $\rho^{in}$  на вході. Задачу **IVP<sub>I</sub>** розв'язували методом Рунге-Кутти з використанням алгоритму RK45. Розподіли густини  $\rho(\xi)$  в трубопроводі залежно від місця розгерметизації для двох значень густини масового потоку на вході  $j^{(in)} = 0,5$  та  $j^{(in)} = 0,9$  показані на рисунках 10 та 11. Обчислення провели для  $K_L = 0,25$ ,  $\rho^{in} = 0,9$   $\xi_L = 0,2; 0,5; 0,8$  (криві 1; 2; 3) та значень безрозмірної густини потоку  $j^{in} = 0,5; 0,7; 0,9$ . Криві 4 на рисунках відповідають течії за відсутності витoku.

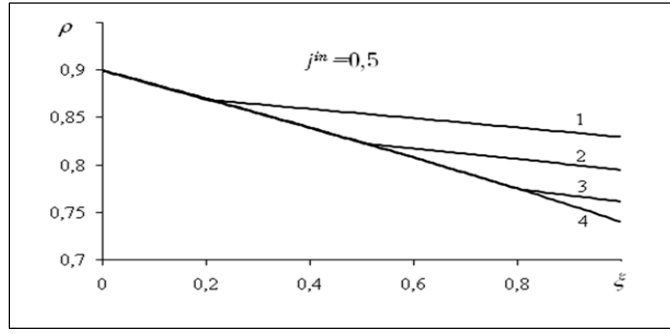


Рисунок 10 - Розподіли густини  $\rho(\xi)$  в трубопроводі залежно від місця розгерметизації для густини масового потоку на вході  $j^{(in)} = 0,5$

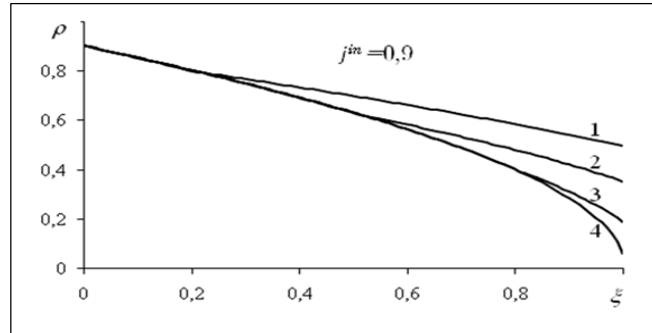


Рисунок 11 - Розподіли густини  $\rho(\xi)$  в трубопроводі залежно від місця розгерметизації для густини масового потоку на вході  $j^{(in)} = 0,9$

Аналізуючи наведені графіки, можна зауважити, що за сталих тиску й масового потоку на вході витік спричиняє зростання тиску на виході проти його значення у разі, коли труба герметична (див. криві 1, 2, 3), а перепад тиску між входом і виходом зменшується. З наближення точки розгерметизації до виходу цей ефект зменшується, оскільки за сталого  $K_L$ , зі зростанням  $\xi_L$  зменшується значення  $\rho_L \equiv \rho(\xi_L)$ , бо функція  $\rho(\xi)$  – спадна.

Розглянемо тепер задачу визначення місця витіку. Виходитимемо із того, що відомі значення потоків  $J^{(in)}$  та  $J^{(out)}$ , а також тиски  $P^{(in)}$  та  $P^{(out)}$ . Нехай  $x_0$  – координата точки розгерметизації. Тоді на відрізку  $[0, x_0]$  зберігається постійний потік  $J^{(in)}$ , а на відрізку  $[x_0, L]$  – потік  $J^{(out)}$ . Відповідно до цього розглянемо дві задачі Коші для рівняння (22) для ізотермічних умов:

$$\frac{\partial \rho}{\partial \xi} = - \frac{Ma^2 \beta j^{(in)2} \tilde{\rho} + Ma \frac{\partial \gamma}{\partial \xi} \rho^3}{Z(\tilde{\rho}) \tilde{\rho}^2 - Ma^2 j^{(in)2}}, \quad \rho|_{\xi=0} = \rho^{(in)} \quad (27)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial \xi} = - \frac{Ma^2 \beta j^{(out)2} \rho + Ma \frac{\partial \gamma}{\partial \xi} \rho^3}{Z(\tilde{\rho}) \tilde{\rho}^2 - Ma^2 j^{(out)2}}, \quad \rho|_{\xi=L} = \rho^{(out)},$$

точка перетину розв'язків яких визначає місце витіку.

Джерелами похибок запропонованого методу виявлення та ідентифікації витоків є: неточність вхідних даних та похибки числового розв'язування задач. Оцінку похибок числового розв'язування задач здійснили із використанням обчислювального експерименту (рис. 12 – 13).

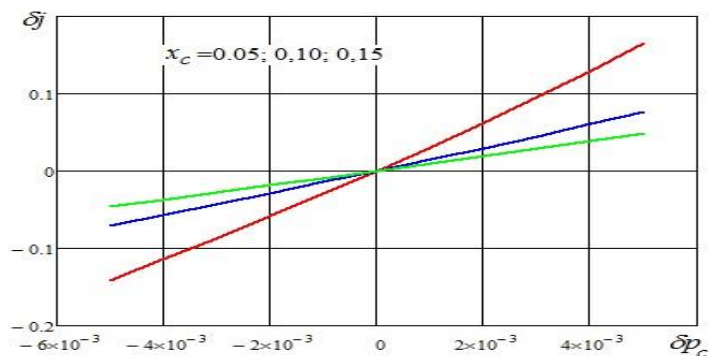


Рисунок 12 - Залежність відносної похибки визначення масової витрати від похибки вимірювання тиску й бази вимірювання.

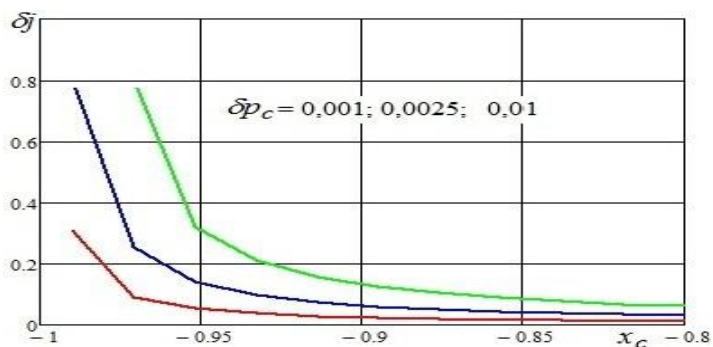


Рисунок 13 - Залежності відносної похибки вимірювання масової витрати від безрозмірної координати точки контролю тиску за різних значень похибки вимірювання тиску

Як бачимо похибка визначення місця витоків за запропонованим методом практично лінійно зростає зі зростанням похибки вимірювання тиску на виході труби (рис.14-15). Коли, наприклад, відносна похибка вимірювання тиску становить  $\pm 0.2\%$ , відносна похибка визначення місця розгерметизації не перевищує 1% від довжини трубопроводу, тобто за довжини труби 100 км абсолютна похибка визначення місця витоків становить  $\pm 1$  км. Проте, тут не врахована похибка визначення масової витрати на вході та виході.

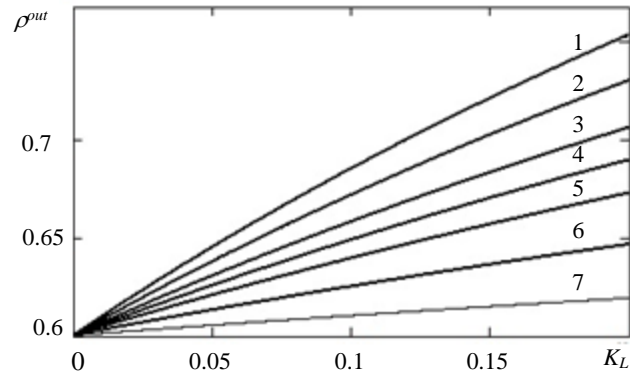


Рисунок 14 - Залежності тиску на виході із труби від інтенсивності витoku, для різних значень координати  $\xi_L = 0.1; 0.25; 0.4; 0.5; 0.6; 0.75; 0.9$  місця розгерметизації

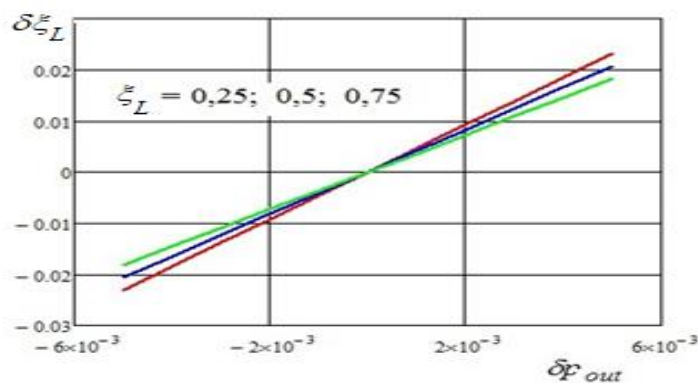


Рисунок 15 - Залежність похибки визначення місця витoku залежно від похибки вимірювання тиску на виході за різних відстаней контрольної точки від входу труби

Для дослідження перехідних процесів за прийнятих умов керування, покладаючи  $\Delta_x = 0,02$ ,  $\Delta_\tau = 2$ ,  $K_L = 0,25$ , використовували модель витoku у вигляді

$$\delta_{\Delta_\xi}(\xi - \xi_L) = \frac{4 \exp(-2(\xi - \xi_L)/\Delta_\xi)}{(1 + \exp(-2(\xi - \xi_L)/\Delta_\xi))^2}, \quad H_{\Delta_\tau}(\tau - \tau_L) = \frac{1}{1 + \exp(-2(\tau - \tau_L)/\Delta_\tau)}. \quad (28)$$

Вважали, що розгерметизація відбулася в точці з координатою  $\xi_L = 0,5$ . Деякі результати проведених досліджень, отримані для проміжку часу  $\tau \in [0, 60]$ , подані у вигляді графіків на рисунку 16.

На рисунку 16 наведені координатні залежності безрозмірної густини потоку  $j$  у фіксовані моменти часу, отримані з розв'язку задачі  $\mathcal{BV}\mathcal{P}_1$ . Горизонтальна штрихова лінія на рисунку 16 відповідає початковому моменту часу  $\tau = 0$ . Стрілки вказують напрямок зростання часу.

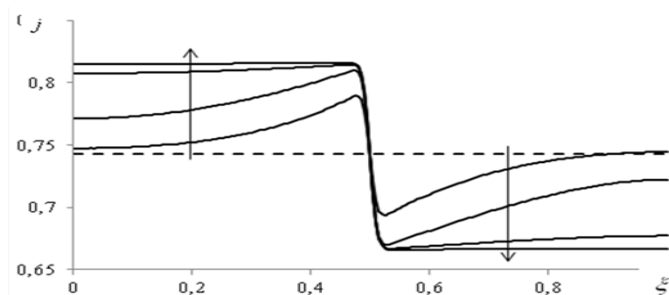


Рисунок 16 - Розподіли безрозмірної густини масового потоку в трубопроводі у фіксовані моменти часу  $\tau = 0, 6, 12, 30, 60$ .

Запровадження неперервного контролю цілісності магістральних газопроводів, які перебувають у експлуатації тривалий час, є ефективним підходом до організації безпечної їхньої експлуатації. У рамках моделі динаміки газу розроблений метод для виявлення витоків, визначення їхньої інтенсивності та місця розгерметизації в секціях МГ за стаціонарних режимів експлуатації на основі даних вимірювання тиску на вході і виході та в контрольних точках вздовж траси.

Отримані критерії цілісності ЛЕ МГ за нестационарних режимів роботи. На цій основі запропоновано метод неперервного контролю цілісності МГ, зважаючи на дані моніторингу значень тиску й температури газу на входах і виходах усіх вузлових елементів, а також швидкості потоку газу на вході першого вузлового елемента.

Розроблено метод контролю цілісності вузлових елементів за нестационарних режимів роботи МГ, який базується на аналізі параметрів хвиль акустичної емісії, спричинених витоків газу через наскрізний отвір у стінці трубопроводу. Інформативними параметрами для нього є сигнали акустичної емісії, отримані від п'єзоелектричних перетворювачів, встановлених на поверхні об'єкта контролю. Запропонована структура системи контролю цілісності МГ і її складових – систем контролю цілісності секцій ЛЧ МГ, ділянок секції ЛЧ МГ, а також систем контролю цілісності вузлових елементів ЛЧ МГ.

**У шостому розділі** запропоновано підхід до автоматизації управління ГТС України. Завданням автоматизації управління ГТС є усунення інформаційної несумісності засобів автоматизації різних технологічних об'єктів і різних напрямів управління, а отже – забезпечення автоматизованого обміну інформацією на вертикалі «технологічні процеси – стратегічне управління». Ефективним засобом для цього є використання систем оперативного управління виробництвом (MES – Manufacturing Execution Systems), що базуються на еталонній моделі управління підприємством (PERA Purdue Enterprise Reference Architecture). Еталонна модель PERA визначає архітектуру виробничої компанії у вигляді п'ятирівневої структури (рис. 17).

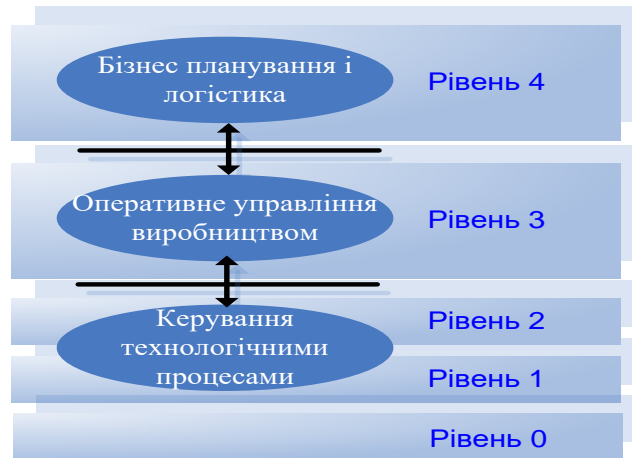


Рисунок 17 - Модель PERA функціональної ієрархії управління

Нульовий рівень моделі визначає фізичні процеси. Перший рівень відповідає за безпосереднє керування фізичними процесами та первинний контроль їхніх параметрів. Тут використовуються виконавчі пристрої (актуатори) та первинні перетворювачі фізичних величин (сенсори). Другий рівень відповідає за контроль і моніторинг параметрів фізичних процесів нульового рівня, режимів роботи та стану технологічного обладнання, характеристик продукту, стану довкілля тощо. Тут діють системи автоматизації процесів (PAS – Process Automation Systems). Третій рівень забезпечує оперативне управління виробничим підприємством (MOM – Manufacturing Operations Management). Четвертий рівень моделі відповідає за бізнес-логістику та планування, (ERP – Enterprise Resource Planning). Він охоплює управління комерційними процесами, що визначають виробничу діяльність підприємства.

Використовуючи понятійний апарат теорії множин і теорії графів, побудовані формалізовані моделі для опису бізнес-процесів транспортування і зберігання газу, а також фізичних процесів у спорудах і газі ГТС. Модель структури для бізнес-процесу «транспортування газу» представлена у вигляді дводольного орієнтованого графа, ребра якого поєднують входи та виходи ГТС. Модель структури для бізнес-процесу «зберігання газу» є сукупністю двох орієнтованих дводольних графів: перший поєднує входи ГТС із ПСГ, а другий поєднує ПЗГ із виходами ГТС. Моделі структури і множини визначальних параметрів для цих бізнес-процесів розраховуються зважаючи на моделі структури ГТС і моделі управління потоками газу, розглянутими в розділі 2.

З використанням методології IDEF0 проведено аналіз функцій управління ГТС як специфічної логістичної системи, яка на стратегічному рівні має ознаки, притаманні дискретним виробництвам, а на рівнях MOM і PAS – неперервним. Це дало змогу розробити модель управління ГТС у рамках концепції MES систем, базуючись на моделі функціональної ієрархії PERA.

Розроблена концепція поетапної модернізації ГТС України, яка базується на створенні, згідно зі стандартом INSI/ISA-95, автоматизованої системи оперативного управління, що функціонує на принципах MES. Реалізація цієї концепції дасть змогу забезпечити автоматичний обмін даними на вертикалі «стратегічне управління – керування технологічними процесами», а також у межах кожного рівня управління.

Це дозволить створити САУ ГТС України, що діятиме на всіх трьох рівнях і в усіх п'яти функціональних напрямках управління (інформаційні процеси, бізнес-процеси, транспортування газу, зберігання газу, експлуатація об'єктів і споруд ГТС).

Для оптимізування затрат на транспортування газу, для оцінювання впливу системи на довкілля та зворотнього впливу, слід враховувати вплив режимів транспортування на технічний стан споруд та взяти до розгляду фізичні процеси, які протікають у системі під час її експлуатації. Для цього ГТС розглянута як відкрита термодинамічна система, що складається зі споруд ГТС і накопиченого в них газу.

Управління газотранспортною системою має на меті: гарантоване доставляння природного газу з входів системи на її виходи в заданих об'ємах згідно з укладеними контрактами на транспортування газу; підтримання системи в технічному стані, який забезпечує гарантоване доставляння та зберігання природного газу та заданий рівень екологічної безпеки; отримання максимального прибутку від роботи ГТС.

Множину функцій управління ГТС розглянуто як сукупність функцій управління цими групами процесів: функції управління інформаційними та бізнес-процесами, функції управління транспортуванням газу, підземним зберіганням газу та експлуатацією споруд ГТС. Для аналізу функцій управління ГТС, механізмів їхньої реалізації та зовнішніх чинників, які впливають на здійснення цих функцій застосована методологія функційного моделювання IDEF0.

Управління ГТС охоплює п'ять функціональних напрямів – інформаційні процеси, бізнес-процеси, транспортування газу, підземне зберігання газу та експлуатація споруд ГТС. На рисунку 18 подана схема, яка показує структуру управління на третьому й четвертому рівнях моделі PERA.



Рисунок 18 - Структура управління ГТС на рівнях ERP та MOM

Програмно-технічний комплекс (ПТК) призначений для автоматизації управління ГТС на рівнях автоматизації технологічних процесів (другий рівень моделі PERA), оперативного управління (третій рівень моделі PERA) і стратегічного управління (четвертий рівень моделі PERA). На кожному рівні діють спеціалізовані програмно-технічні системи (ПТС), які забезпечують автоматизацію управління у всіх функціональних напрямках – інформаційні процеси, транспортування та підземного зберігання газу, технічне обслуговування та ремонти.

У роботі наведена структура програмно-технічного комплексу для автоматизації управління ГТС, подані та показані програмно-технічні системи, які використовуються на різних рівнях моделі управління PERA.

З використанням методології IDEF0 проведено аналіз функцій управління ГТС як специфічної логістичної системи, яка на стратегічному рівні має ознаки, притаманні дискретним виробництвам, а на рівнях MOM і PAS – неперервним. Це дало змогу розробити модель управління ГТС у рамках концепції MES систем, базуючись на моделі функціональної ієрархії PERA. Її складовими є інформаційна модель та модель активності на рівні оперативного управління ГТС. Розроблена інформаційна модель визначає зміст інформаційних потоків між MOM і PAS та MOM і ERP рівнями для бізнес-процесів транспортування та зберігання газу. У рамках моделі s-MES деталізовано визначальні процеси активності на рівні MOM, які враховують специфіку ГТС.

Управління роботою ГТС на оперативному рівні відбувається способом зміни параметрів фізичних процесів, які протікають у транспортованому газі й у спорудах ГТС. Водночас кожній технологічній задачі можна поставити у відповідність певні фізичні процеси, а тому і їхні математичні моделі. На рисунку 19 показана відповідність між технологічними задачами, пов'язаними із транспортуванням газу й математичними моделями.

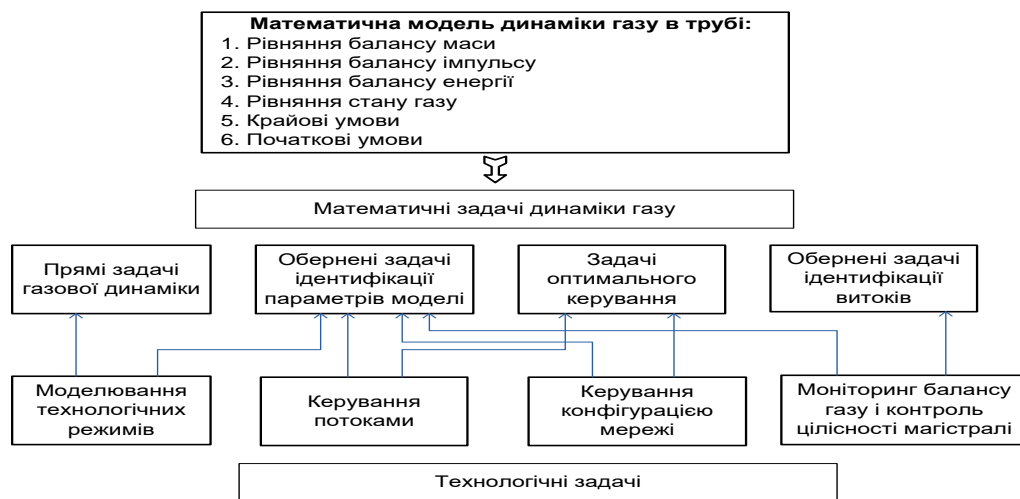


Рисунок 19 - Технологічні процеси управління транспортуванням газу та відповідні їм математичні задачі

Стандарт ANSI/ISA 95 утворює концептуальну основу, у рамках якої, застосовуючи сучасні комп'ютерні та інформаційно-комунікаційні-технології, можна розв'язувати проблему автоматизації управління ГТС комплексно. Тому модернізацію управління ГТС доцільно здійснювати поетапно, зі збереженням уже наявних засобів, способом автоматизації оперативного управління із використанням MES. З цією метою був запропонований підхід, який передбачає поступове нарощування функціоналу автоматизованої системи управління ГТС (рис. 20).





Рисунок 20 - Схема поетапного впровадження системи автоматизації управління в ГТС України

У розділі, використовуючи понятійний апарат теорії множин і теорії графів, побудовані формалізовані моделі для опису бізнес-процесів транспортування і зберігання газу, а також фізичних процесів у спорудах і газі ГТС; із використанням методології IDEF0 проведено аналіз функцій управління ГТС як специфічної логістичної системи, яка на стратегічному рівні має ознаки, притаманні дискретним виробництвам, а на рівнях MOM і PAS – неперервним, що дало змогу розробити модель управління ГТС у рамках концепції MES систем, базуючись на моделі функціональної ієрархії PERA; запропонована структура програмно-апаратного комплексу для автоматизації управління ГТС та визначені функції програмно-технічних систем, які використовуються на різних рівнях управління, математично-алгоритмічне забезпечення для цих систем; розроблена концепція поетапної модернізації ГТС України, яка базується на створенні, згідно зі стандартом INSI/ISA-95, автоматизованої системи оперативного управління, що функціонує на принципах MES. Отримані у роботі результати передані філії «НДІ транспорту газу» ПАТ «УКРТРАНСГАЗ». Вони використані у стратегії розвитку інформаційної платформи оператора газотранспортної системи і у складі програмного комплексу, створеного у відділі розробки систем оптимального планування і прогнозування режимів роботи ГТС для диспетчерського управління МГ.

## ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв’язано важливу науково-прикладну проблему – розроблення концепції побудови програмно-технічної системи для автоматизації управління ГТС на основі розроблених математичних моделей, методів і алгоритмів для керування процесами транспортування газу МГ.

Зважаючи на закони збереження маси, імпульсу та енергії розроблені математичні моделі динаміки газу в лінійних та вузлових елементах ГТС. Встановлені також умови спряження ключових функцій ЛЕ і ВЕ на межах їхнього контакту.

Розроблена математична модель локального витоку, яка дає змогу враховувати інтенсивність витоку через негерметичність стінки труби чи нещільність з'єднання, площа якого мала порівнюючи з перетином трубопроводу, залежно від тиску (густини) та температури газу в трубі в околі місця розгерметизації.

Для моделювання нестационарної течії газу в МГ розглядали його як лінійну структуру секцій ЛЧ, поєднаних КС, а кожен секцію як систему ЛЕ, послідовно з'єднаних між собою ВЕ. На основі даних моніторингу тиску, температури та витрати (чи швидкості руху) газу на вході та виході кожної КС розраховували відповідні емпіричні функції, які визначають крайові умови для задач моделювання нестационарної течії газу в кожній секції, що дало змогу звести опис течії газу в МГ до опису течії в усіх його секціях, а також проводити моніторинг цілісності трубопроводів та балансування маси газу.

Побудована узагальнена математична модель для опису течії газу в секції МГ за перехідних режимів його експлуатації, яка враховує динаміку для всіх ЛЕ і ВЕ, умови спряження ключових функцій, початкові та крайові умови, визначені з використанням емпіричних функцій. Розглянуто також спрощений варіант моделі, у якому не врахована інерційність мас газу, накопичених у внутрішніх порожнинах ВЕ.

Для секцій, лінійні елементи яких є відрізками труб одного діаметра, запропонований підхід, який базується на моделі віртуального вузлового елемента. За цим підходом ВЕ в моделі структури секції заміняємо відрізками труб, такого ж діаметра, як і ЛЕ секції. Довжину й коефіцієнт гідравлічного опору віртуального ВЕ вибрано так, щоб його об'єм і гідравлічний опір дорівнювали відповідним значенням цих параметрів реального ВЕ. Це дало змогу звести математичну модель течії в секції до сукупності трьох рівнянь із частинними похідними, які описують перенесення маси, імпульсу та тепла у віртуальній секції та крайових умов, визначених із використанням емпіричних функцій.

Розроблені математичні моделі формують теоретичну основу й математичний апарат для технологічних задач керування потоками газу в МГ, як-от ідентифікація параметрів математичних моделей ЛЕ і ВЕ, числове моделювання, планування та оптимізація стаціонарних і перехідних режимів роботи МГ, балансування маси газу, виявлення витоків та контроль цілісності ЛЧ МГ, оптимізація структури ГТС.

Розроблені моделі керування перехідними процесами. Кожній моделі відповідає певна крайова задача для рівнянь динаміки газу в довгому трубопроводі. Дослідження перехідних процесів для моделей керування, які проведено з використанням функцій керування, що залежить від значення контрольованого параметра та часових параметрів – моментів початку й завершення зміни функції керування, дало змогу визначити ефективність транспортування газу. Результати проведених числових експериментів використовують, щоб керувати параметрами перехідного процесу, як-от його тривалість  $\tau_{gr}$ , питома механічна робота, затрачена на відбір газу із ГТС на вході трубопроводу та на подавання його в мережу на виході тощо.

у рамках нелінійної моделі динаміки газу в довгому трубопроводі сформульовані задачі оптимального керування стаціонарними потоками транспортування газу магістральним трубопроводом, запропонований метод для їхнього числового розв'язування.

Розроблена математична модель поширення малих збурень у потоці газу трубопроводу, яка включає лінійну систему рівнянь із частинними похідними, коефіцієнти якої сильно залежать від режиму течії – з наближенням до критичного режиму їхні значення та просторова неоднорідність зростають.

У рамках моделі сформульована задача визначення хвильового поля збурення, спричиненого локальною флуктуацією тиску та розроблена методика її числового розв'язування із використанням методу скінченних різниць. Проведені дослідження хвильового поля дали змогу виявити місце виникнення флуктуації та ідентифікувати витоки.

У рамках моделі динаміки газу розроблений метод для виявлення витоків, визначення їхньої інтенсивності та місця розгерметизації в секціях МГ за стаціонарних режимів експлуатації на основі даних вимірювання тиску на вході і виході та в контрольних точках вздовж траси.

Отримані критерії цілісності ЛЕ МГ за нестаціонарних режимів роботи. На цій основі запропоновано метод неперервного контролю цілісності МГ, зважаючи на дані моніторингу значень тиску й температури газу на входах і виходах усіх вузлових елементів, а також швидкості потоку газу на вході першого вузлового елемента.

Розроблено метод контролю цілісності вузлових елементів за нестаціонарних режимів роботи МГ, який базується на аналізі параметрів хвиль акустичної емісії, спричинених витокком газу через наскрізний отвір у стінці трубопроводу. Інформативними параметрами для нього є сигнали акустичної емісії, отримані від п'єзоелектричних перетворювачів, встановлених на поверхні об'єкта контролю. Запропонована структура системи контролю цілісності МГ і її складових – систем контролю цілісності секцій ЛЧ МГ, ділянок секції ЛЧ МГ, а також систем контролю цілісності вузлових елементів ЛЧ МГ.

Побудовані моделі для опису бізнес-процесів транспортування і зберігання газу, а також фізичних процесів у спорудах і газі ГТС. Для обох бізнес-процесів введені множини їхніх визначальних параметрів, які необхідні для управління цими процесами. Моделі структури і множини визначальних параметрів для цих бізнес-процесів розраховуються зважаючи на моделі структури ГТС і моделі управління потоками газу.

З використанням методології IDEF0 проведено аналіз функцій управління ГТС. Розроблена модель управління ГТС у рамках концепції MES систем, базуючись на моделі функціональної ієрархії PERA. Її складовими є інформаційна модель та модель активності на рівні оперативного управління ГТС. Розроблена інформаційна модель визначає зміст інформаційних потоків для бізнес-процесів транспортування та зберігання газу. Запропонована структура програмно-апаратного комплексу для автоматизації управління ГТС. Визначені функції програмно-технічних систем, які використовуються на різних рівнях управління, математично-алгоритмічне забезпечення для цих систем.

Розроблена концепція поетапної модернізації ГТС України, яка базується на створенні, згідно зі стандартом INSI/ISA-95, автоматизованої системи оперативного управління, що функціонує на принципах MES. Реалізація цієї концепції дасть змогу забезпечити автоматичний обмін даними на вертикалі «стратегічне управління – керування технологічними процесами», а також у межах кожного рівня управління. Це дасть змогу створити САУ ГТС України, що діятиме на всіх трьох рівнях і в усіх п'яти функціональних напрямках управління (інформаційні процеси, бізнес-процеси, транспортування газу, зберігання газу, експлуатація об'єктів і споруд ГТС). Розроблена концепція поетапної модернізації використана під час розроблення планів розвитку ГТС України, проекту «SCADA», який включений у десятирічний «План розвитку газотранспортної системи ТОВ «Оператор газотранспортної системи України» на 2021-2030 роки».

### Список публікацій здобувача

#### *Колективні монографії*

1. Chekurin V., Kushnir R., Ponomarev Yu., Prytula M., Khymko O. A Model of a System for Gas Transmission Pipeline Integrity Monitoring. In the book: Degradation Assessment and Failure Prevention of Pipeline Systems (Eds. Bolzon G., Gabetta G. and Nykyforchyn H.) (Series: Lecture Notes in Civil Engineering, Volume 102). Springer 2021. Pp.99–114. (*Scopus, закордонне видання*).
2. Chekurin V., Khymko O. Graph Theoretic Model For Structure Of A Gas Transmission System. – In book “Nauka i technika u prognozie III tysaclecia. Pod red. Aleksandry Mrely I Piotra Wikoszewskiego. Bydgoszcz: Wydawnictwo Kujawsko-Pomorskiej Szkoły Wyższej w Bydgoszczy. Bydgoszcz, 2014. 158s. Pp. 18–28. (*Закордонне видання*).  
*Статті, що опубліковані в наукових фахових виданнях України*
3. Chekurin V., Khymko O. Mathematical modeling of a small pressure disturbance in gas flow of a long pipeline Mathematical Modeling and Computing. 2017. Vol. 4, No. 2, pp. 126–138. (*Scopus*).
4. Pyanylo Ya.1, Prytula N.2, Prytula M.2, Khymko O.1 On an invariant of a non-stationary model of pipelines gas flow. Mathematical modeling and computing. 2019.Vol. 6, No. 1, pp. 116–128. (*Scopus*).
5. Chekurin V. F., Khymko O. M. Numerical modeling transient processes in a long gas pipeline. Mathematical modeling and computing, Vol. 6, No. 2, pp. 220–238 (2019). (*Scopus*).
6. Чекурін В. Ф., Притула М. Г., Химко О. М. Структура та функції інтегрованого програмно-технічного комплексу для автоматизації управління газотранспортною системою. Автоматика, вимірювання та керування. 2013. № 774. С. 51–60.
7. Чекурін В., Притула М., Химко О. Математична модель структури газотранспортної системи. Комп'ютерні науки та інформаційні технології. 2013. № 771. С. 187–196.
8. Чекурін В. Ф., Притула М. Г., Химко О. М. Методологія MES і комп'ютеризація управління ГТС. Комп'ютерні системи та мережі. 2014. № 806. С.275–283.

9. Пономарьов Ю. В., Притула М. Г., Химко О. М., Чекурін В. Ф. Автоматизація управління ГТС: стан та перспективи розвитку з використанням MES. Нафтогазова галузь України. 2015. № 5. С. 40–45.
10. Притула М. Г., Химко О. М., Чекурін В. Ф. Методологія побудови комп'ютеризованих систем управління виробничими підприємствами з використанням MES. Нафтогазова галузь України. 2015. № 1. С. 31–36.
11. Чекурін В. Ф., Химко О. М. Задачі оптимального керування потоками газу в довгому трубопроводі. Механіко-технологічні системи та комплекси. 2015. № 21. С. 104–111.
12. Химко О., Гринів О., Притула Н., Притула М. Алгоритмічний метод діагностики витоків газу на ділянках магістральних газопроводів. Комп'ютерні науки та інформаційні технології. Львів, 2015. № 826. С. 404–412.
13. Чекурін В. Ф., Химко О. М. Моделювання системи виявлення та ідентифікації витоків у магістральних газопроводах. Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: технічні науки. 2018. 29 (68) Ч. 2, № 1. С. 52–57.
14. Чекурін В. Ф., Химко О. М. Моделювання функцій програмного комплексу для автоматизації управління газотранспортними системами. Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: технічні науки. 2018. 29 (68) № 2. С. 192–197.
15. Chekurin V., Ponomaryov Yu., Prytula M., Khyenko O. Development of an approach to automation of gas transmission system management. Technology Audit and Production Reserves. 2018. № 5/1(43), p. 52 – 60.
16. Чекурін В. Ф., Химко О. Я. Математична модель для контролю цілісності лінійної частини магістрального газопроводу. Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: технічні науки. 2019. 30 (69). № 1 (ч. 1). С. 158–164.
17. Чекурін В. Ф., Химко О. Я., Пономарьов Ю. В. Метод контролю цілісності лінійної частини магістрального газопроводу за даними моніторингу параметрів потоку. Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: технічні науки. 2019. Том 30 (69) Ч. 1 № 2. С. 234–240.
18. Чекурін В. Ф., Химко О. М. Перехідні процеси течії газу в трубопроводі, спричинені локальним витокком. Математичні методи та фізико-механічні поля. 2019. Т. 62, № 3. С. 142–158. (*Фахове видання категорії А*).
19. Чекурін В. Ф., Пономарьов Ю. В., Притула М. Г., Химко О. М. Підхід до автоматизації управління газотранспортною системою України. Технічна діагностика та неруйнівний контроль. 2020. № 4. С. 23–31.
20. Н. Притула, І. Боярин, В. Ямнич, О. Гринів, О. Химко Ідентифікація параметрів моделі газотранспортної системи. Комп'ютерні науки та інформаційні технології. Львів, 2011. № 694. С. 270–276.

*Стаття, опублікована в науковому періодичному виданні іншої держави*

21. Chekurin V., Ponomaryov Yu, Khyenko O. A mathematical model for evaluation the efficiency of gas-main pipeline in transient operational modes// Econtechmod. 2015, 4, No.3. P. 25–32. (*Index Copernicus, закордонне видання*).

*Статті, що опубліковані в наукових нефахових виданнях України, які додатково відображають результати дисертації:*

22. Чекурін В., Притула М., Химко О. Моделювання архітектури та функціональності програмно-технічного комплексу для автоматизації управління магістральними газопроводами. Фізико-математичне моделювання та інформаційні технології, 2013. № 18. С. 209–218.
23. Василь Чекурін, Ольга Химко. Математичні моделі для ідентифікації витоків в довгому газопроводі. Стационарний режим. Фізико-математичне моделювання та інформаційні технології, 2017. Вип.25. С.157-162.
24. Чекурін В., Химко О. Чисельне дослідження перехідних процесів у довгому газопроводі, спричинених розгерметизацією. Фізико-математичне моделювання та інформаційні технології. 2017. Вип. 26. С. 100–111.

#### *Матеріали конференцій*

25. Chekurin V., Khymko O. Wave of pressure in gas pipeline: a telegraph-type model/Proceedings of XXIII International Seminar/Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory (DIPED-2018). Tbilisi State University, Tbilisi, Georgia, 2018, 256 p. Pp.157–160. (*IEEE Explore, Scopus, закордонне видання*)
26. Chekurin V., Khymko O. A Mathematical Model for Propagation of Long Acoustic Waves in the Flow of a Gas Pipeline, Lviv, Ukraine// Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory (DIPED – 2017), Dnipro, 2017, pp. 183–186.
27. Чекурін В. Ф., Притула М. Г., Пономарьов Ю. В., Химко О. М. Концепція MES і автоматизація управління ГТС. Нафтогазова енергетика 2015: матеріали IV міжнар. наук.-техн. конф. (м. Івано-Франківськ 21–24 квітня 2015 року). Івано-Франківськ, 2015. С.135–139.
28. Чекурін В, Ф., Химко О. М. Математичні моделі, методи та алгоритми виявлення та ідентифікації витоків у магістральних газопроводах. АВТОМАТИКА – 2017: матеріали XIV міжнар. конф. з автоматичного управління (м. Київ 13 – 15 вересня 2017). Київ, 2017. С.49–51.
29. Химко О., Чекурін В. Моделювання структури програмного комплексу для управління газотранспортними системами. Інформаційні технології та комп'ютерне моделювання: матеріали міжнар. наук.-практ. конф. (м. Івано-Франківськ 15–20 травня 2017 року). Івано-Франківськ, 2017. С.28 – 31.
30. Чекурін В., Химко О. Задачі динаміки газу в довгому трубопроводі за локальної розгерметизації. «Сучасні проблеми механіки та математики: матеріали міжнар. наук. конференції до 90-річчя від дня нар. акад. Я. С. Підстригача» (м. Львів 22 – 25 травня 2018 р) : зб. наук. пр. у 3-х т. Львів, 2018. Т2. С.167.
31. Чекурін В. Ф., Химко О. М. Прямі й обернені задачі динаміки газу в довгому трубопроводі. Обчислювальні методи й системи перетворення інформації: зб. пр. V наук.-техн. конф., (м. Львів 4–5 жовтня 2018р.). Львів, 2018. Вп.5. С.81–83.
32. Василь Чекурін, Юрій Пономарьов, Ольга Химко. Математичне моделювання перехідних процесів у довгому газопроводі з локальним витоків. Інформаційні системи та технології. ICT-2019: матеріали 8-ї міжнар. наук.-техн. конф. (м. Коблеве- м. Харків 9–14 вересня 2019), Харків, 2019. С.297–301.

## Патенти

33. Клюк Б. О., Вечерік Р. Л., Рудко В. В., Гордієнко О. М., Гуменюк А. І., Микитин В. М., Петришак Г. В., Химко О. М. Пристрій для очищення внутрішньої поверхні трубопроводу малого діаметру. Патент України на корисну модель № 58710 від 26.04.2011р., бюл.№ 8, 2011.
34. Клюк Б. О., Вечерік Р. Л., Рудко В. В., Гордієнко О. М., Гуменюк А. І., Гордієнко В. О., Петришак Г. В., Химко О. М. Пристрій для промивки фільтрів на вибої свердловин ПСГ. Патент України на корисну модель № 58711 від 26.04.2011р., бюл. № 8, 2011.

## АНОТАЦІЯ

**Химко О. М. Математичні моделі, методи та алгоритми для автоматизації управління газотранспортними системами.** – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.07 «Автоматизація процесів керування». – Національний університет «Львівська політехніка», Львів, 2021.

У дисертаційній роботі розв’язано важливу науково-прикладну проблему – розроблення концепції побудови програмно-технічної системи для автоматизації управління ГТС на основі розроблених математичних моделей, методів і алгоритмів для керування процесами транспортування газу МГ.

У процесі розв’язання цієї проблеми розроблено дворівневу математичну модель структури газотранспортної системи (ГТС), що враховує можливі зміни її конфігурації в процесі експлуатації, а також її розмірну гетерогенність. З використанням рівнянь динаміки газу розроблені нелінійні математичні моделі течії газу в лінійних та вузлових елементах МГ із врахуванням можливої негерметичності цих елементів. З використанням цих рівнянь сформульовані крайові задачі, які моделюють технологічні процеси керування режимами роботи ГТС, забезпечують виявлення витоків і моніторингу цілісності трубопроводів та оперативне балансування маси газу в МГ. З використанням методу скінченно-різницевої дискретизації ключових рівнянь за просторовою координатою, ітераційного підходу та методів Рунге-Кутти розроблені методи розв’язування сформульованих нелінійних прямих задач.

Розроблено математичну модель поширення малих збурень параметрів потоку газу в трубопроводі, яка описує хвильові процеси, спричинені нестабільністю роботи компресорів, локальною розгерметизацією, флуктуаціями тиску, густини й температури.

Розроблені моделі керування перехідними процесами, з використанням яких будь-який процес переходу з одного стаціонарного режиму в інший визначається скінченням набором параметрів. Проведені кількісні дослідження перехідних процесів течії газу в секції МГ за різних моделей керування.

З використанням розроблених обчислювальних методів проведені кількісні дослідження параметрів перехідних процесів течії газу, які виникають у МГ під час його локальної розгерметизації та кількісно досліджені параметри течії, які можна використати для виявлення та ідентифікації витоків.

Запропонована концепція автоматизації управління ГТС України, яка базується на теорії MES систем та моделі PERA відповідно до вимог міжнародного стандарту ANSI/ISA-95. Визначені функції та розроблена структура програмної системи для автоматизації управління ГТС, а також системи моніторингу цілісності МГ у її складі та запропонований підхід до її поетапного впровадження зі збереженням наявних засобів, які відповідають сучасним вимогам.

**Ключові слова:** процеси управління, функції управління, автоматизація управління, математичні моделі, обчислювальні методи, газопроводи, течія, стаціонарні й перехідні режими течії, керування течією газу, модель PERA, MES-системи.

## АННОТАЦІЯ

**Химко О. М. Математические модели, методы и алгоритмы для автоматизации управления газотранспортными системами.** – Квалификационный научный труд на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.13.07 «Автоматизация процессов управления». – Национальный университет «Львовская политехника», Львов, 2021.

В диссертационной работе решена важная научно-прикладная проблема - разработка концепции построения программно-технической системы для автоматизации управления ГТС на основе разработанных математических моделей, методов и алгоритмов для управления процессами транспортировки газа МГ.

В ходе решения этой проблемы разработана двухуровневая математическая модель структуры ГТС, учитывающая возможные изменения ее конфигурации в процессе эксплуатации, а также ее размерную гетерогенность. С использованием уравнений динамики газа разработаны нелинейные математические модели течения газа в линейных и узловых элементах МГ с учетом возможной негерметичности этих элементов. С использованием этих уравнений сформулированы краевые задачи, которые моделируют технологические процессы управления режимами работы ГТС, обеспечивают обнаружения утечек и мониторинга целостности трубопроводов, а также оперативное балансирование массы газа в МГ. С использованием метода конечно-разностной дискретизации ключевых уравнений пространственной координатой, итерационного подхода и методов Рунге-Кутты разработаны методы решения сформулированных нелинейных прямых задач.

Разработана математическая модель распространения малых возмущений параметров потока газа в трубопроводе, описывающая волновые процессы, вызванные нестабильностью работы компрессоров, локальной разгерметизацией, флуктуациями давления, плотности и температуры.

Разработанные модели управления переходными процессами, с использованием которых любой процесс перехода из одного стационарного режима в другой определяется конечным набором параметров. Проведенные количественные исследования переходных процессов течения газа в секции МГ при различных моделях управления.

С использованием разработанных вычислительных методов проведены количественные исследования параметров переходных процессов течения газа,



возникающие в МГ при его локальной разгерметизации и количественно исследованы параметры течения, которые можно использовать для обнаружения и идентификации утечек.

Предложенная концепция автоматизации управления ГТС Украины, которая базируется на теории MES систем и модели PERA в соответствии с требованиями международного стандарта ANSI / ISA-95. Определены функции и разработана структура программной системы для автоматизации управления ГТС, а также системы мониторинга целостности МГ в ее составе и предложен подход к ее поэтапному внедрению с сохранением существующих средств, соответствующих современным требованиям.

**Ключевые слова:** процессы управления, функции управления, автоматизация управления, математические модели, вычислительные методы, газопроводы, течение, стационарные и переходные режимы течения, управления течением газа, модель PERA, MES- системы.

### ABSTRACT

**Khymko O. M. Mathematical models, methods and algorithms for automation of gas transmission systems control.** Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

The thesis for the degree of Doctor of Technical Sciences in specialty 05.13.07 «Automation of control processes». – Lviv Polytechnic National University, Lviv, 2021.

The dissertation is aimed at developing methodological bases for automating the management of gas transmission systems using the methods of mathematical modeling and computerization.

The aim of the work is to develop mathematical models of methods and algorithms for solving problems of control of stationary and transient modes of gas flow in main gas pipelines (MGP), detection and identification of leaks, as well as elaboration of concept and methodological bases of gas transmission system (GTS) automation and determination of structure and functions. -technical control automation systems.

To achieve this goal in the dissertation solved a number of problems and obtained new scientific results.

Mathematical models have been developed to describe the structure of the GTS, which take into account changes in its configuration during operation and dimensional heterogeneity. Based on the equations of dynamics, nonlinear mathematical models of gas flow in MGP elements are developed taking into account their leaks and on this basis boundary value problems are formulated, which model technological processes of GTS operation control, leak detection and MGP integrity control. Using known computational methods, developed methods for solving formulated problems and fast algorithms for their implementation.

A mathematical model for the propagation of small perturbations of gas flow parameters in a pipeline has been developed, which describes wave processes caused by compressor instability, local depressurization, fluctuations in pressure, density and temperature. Quantitative studies have revealed a significant dependence of the parameters of wave processes on the flow regime in which the disturbance occurs, as well as the location of fluctuations along the pipeline.

Transition control models have been developed, using which any process of transition from one stationary mode to another is determined by a finite set of parameters. Quantitative studies of gas flow transients in the MGP section under different control models have been carried out. Integral parameters have been introduced that determine the efficiency of gas transportation during the transition mode according to various criteria. Quantitative estimates of the efficiency of MGP gas transportation during the transition regime are obtained, depending on the applied transition control models.

Mathematical models of local leakage from MGP have been developed, which determine the intensity of gas leakage through a small hole in the pipe wall depending on the pressure and temperature of the gas in the pipe near the depressurization site. Using the developed computational methods, quantitative studies of the parameters of gas flow transients that occur in the MGP during its local depressurization and quantitatively studied flow parameters that can be used to detect and identify leaks. On this basis, mathematical methods for detecting and identifying leaks from MGP based on the measurement of gas flow parameters at control points have been developed and their accuracy has been investigated using the method of computational experiment.

The concept of automation of control of GTS of Ukraine which is based on the theory of MES of systems and PERA model according to requirements of the international ANSI / ISA-95 standard is offered. The functions and structure of the software system for automation of GTS management, as well as the system of monitoring the integrity of the MGP in its composition are defined and the approach to its step-by-step implementation with the preservation of existing tools that meet modern requirements is proposed.

Introduced integrated parameters of gas flow allow to quantify the efficiency of the transition process by energy and time parameters. Using the developed fast algorithms for solving boundary value problems, it can be used to control the transient modes of operation of the MGP in order to achieve a given process duration or specified energy performance.

The proposed mathematical models of local leakage and gas dynamics in MGP with leakage, as well as the developed fast algorithms for solving boundary value problems form a theoretical and mathematical basis for the method of detecting and identifying parameters of leakage MGP using an approach based on modeling mass, momentum and real-time energy and flow measurement data at control points along the pipeline.

The introduction of the GTS control automation system, based on the theory of MES systems, the PERA model and the international standard ANSI / ISA-95, the structure and functions of which are proposed in the work, will preserve the existing automation tools. This will create the preconditions for the transition from a functional to a process management model.

**Keywords:** control processes, control functions, control automation, mathematical models, computational methods, gas pipelines, flow, stationary and transient flow regimes, gas flow control, PERA model, MES systems.