



Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет інформаційно-аналітичних технологій та менеджменту

Кафедра прикладної математики

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 113 Прикладна математика

(код і повна назва)

Тип програми освітньо-професійна

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Прикладна математика

(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри ПМ \_\_\_\_\_

(підпис)

“ 06 ” листопада 2023 р.

## ЗАВДАННЯ

### НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Полятикіну Андрію Олександровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Комп'ютерне моделювання нестационарних режимів течії газу по багатонитковій лінійній ділянці газопроводу

затверджена наказом по університету від 2 листопада 2023 р. № 1276 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 10 січня 2024 р.

3. Вихідні дані до роботи структура багатониткової лінійної ділянки газопроводу та математична модель нестационарного режиму течії газу по ділянці газопроводу

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі \_\_\_\_\_

1. Аналіз предметної області

2. Вибір і обґрунтування методу розв'язання

3. Програмна реалізація

4. Результати обчислювального експерименту

5. Аналіз можливих застосувань

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій \_\_\_\_\_

1. Актуальність теми роботи \_\_\_\_\_

2. Постановка задачі \_\_\_\_\_

3. Аналіз предметної області \_\_\_\_\_

4. Метод чисельного аналізу \_\_\_\_\_

5. Результати обчислювального експерименту \_\_\_\_\_

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Підбір та вивчення технічної літератури за темою роботи	6 – 12 листопада 2023 р.	виконано
2	Вибір та обґрунтування методу	13 – 26 листопада 2023 р.	виконано
3	Розробка алгоритму і програми	27 листопада – 10 грудня 2023 р.	виконано
4	Проведення аналітичних досліджень та розрахунків	11 грудня – 24 грудня 2023 р.	виконано
5	Робота над текстом пояснювальної записки	25 грудня 2023 р. – 9 січня 2024 р.	виконано
6	Представлення роботи на рецензію в ЕК	10 січня 2024 р.	виконано

Дата видачі завдання 6 листопада 2023 р.

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Керівник роботи \_\_\_\_\_ проф. Гусарова І.Г.  
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 69 с., 22 табл., 7 рис., 1 дод., 8 джерел.

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ, РЕЖИМ ТЕЧІЇ ГАЗУ, НЕСТАЦІОНАРНИЙ НЕІЗОТЕРМІЧНИЙ РЕЖИМ, СТАЦІОНАРНИЙ РЕЖИМ, ДІЛЯНКА ГАЗОПРОВОДА, МЕТОД СКІНЧЕНИХ РІЗНИЦЬ, НЕЯВНА РІЗНЕЦЕВА СІТКА.

Об'єкт дослідження – є нестационарний неізотермічний режим течії газу по багатонитковій лінійній ділянці трубопроводу.

Мета роботи – математичне моделювання нестационарного неізотермічного режиму транспорту газу по багатонитковим лінійними ділянками газопроводу, яке може забезпечити безпеку і надійність газопроводу, ефективність експлуатації в аварійних та нештатних ситуаціях.

Методи дослідження – чисельні методи розв'язання взаємопов'язаних систем диференціальних рівнянь у частинних похідних.

У даній кваліфікаційній роботі розглянута задача моделювання нестационарного неізотермічного режиму течії газу по багатонитковій лінійній ділянці трубопроводу. Проведено аналіз предметної області та постановка задач дослідження. Обрано математичну модель нестационарного неізотермічного режиму течії газу по багатонитковій лінійній ділянці трубопроводу та побудовано чисельний метод та алгоритм розв'язання системи рівнянь математичної моделі з використанням методу скінчених різниць. Розроблено програмний продукт для розрахунку параметрів газового потоку. Проведений аналіз результатів чисельних експериментів.

Отримані результати можуть бути використані при проектуванні та експлуатації багатониткових лінійних ділянок газопроводу. Вони дозволяють прогнозувати наслідки виникнення надзвичайних або аварійних ситуацій та, отже, слугувати основою для поліпшення управління газотранспортною системою та автоматизації процесу постачання газу споживачам.

## ABSTRACT

Introductory note: 69 pages, 22 tables, 7 figures, 1 appendix, 8 sources.

MATHEMATICAL MODEL, GAS FLOW REGIME, NON-STEADY NON-ISOTHERMAL REGIME, STEADY REGIME, GAS PIPELINE SECTION, FINITE DIFFERENCE METHOD, IMPLICIT DIFFERENCE GRID.

Object of research – the non-steady non-isothermal regime of gas flow through a multi-threaded linear pipeline section.

Purpose of work – the mathematical modeling of the non-steady non-isothermal regime of gas transport through multi-threaded linear sections of the pipeline, which can ensure the safety and reliability of the pipeline, as well as the efficiency of its operation in emergency and abnormal situations.

Methods of research – numerical methods for solving interconnected systems of partial differential equations.

In this qualification work, the task of modeling the non-steady non-isothermal regime of gas flow through a multi-threaded linear pipeline section is considered. An analysis of the subject area and the setting of research tasks have been conducted. A mathematical model of the non-steady non-isothermal regime of gas flow through a multi-threaded linear pipeline section has been chosen, and a numerical method and algorithm for solving the system of the mathematical model's equations using the finite difference method have been developed. A software product for calculating the parameters of the gas flow has been developed. An analysis of the results of numerical experiments has been conducted.

The obtained results can be used in the design and operation of multi-threaded linear pipeline sections. They allow predicting the consequences of emergency or accident situations, and thus, serve as a basis for improving the management of the gas transportation system and automating the process of gas supply to consumers.

## ЗМІСТ

	С.
Перелік скорочень, умовних познач, одиниць і термінів .....	7
Вступ .....	8
1 Аналіз предметної області та постановка задач дослідження .....	11
1.1 Методи чисельного аналізу нестационарних неізотермічних режимів течії газу по багатонитковим лінійним ділянкам газопроводу .....	11
1.2 Змістовна та формальна постановка задачі .....	17
1.3 Постановка задач дослідження .....	19
2 Вибір та обґрунтування методу розв'язання .....	20
2.1 Математична модель нестационарних неізотермічних режимів течії газу по багатонитковим лінійним ділянкам газопроводу .....	20
2.2 Метод скінчених різниць з використанням неявної різницевої сітки .....	22
Висновки за розділом 2 .....	27
3 Програмна реалізація .....	28
3.1 Система комп'ютерної алгебри Mathematica 13.1 .....	28
3.2 Опис задачі моделювання нестационарного неізотермічного процесу транспорту газу по багатонитковій лінійній ділянці газопроводу .....	29
3.3 Опис програми .....	31
Висновки за розділом 3 .....	32
4 Результати обчислювального експерименту та їх аналіз .....	33
4.1 Обчислювальний експеримент для стаціонарного режиму течії газу по багатонитковій лінійній ділянці газопроводу .....	33
4.2 Обчислювальний експеримент для нестационарного режиму течії газу по багатонитковій лінійній ділянці газопроводу .....	35
Висновки за розділом 4 .....	50
Висновки .....	52
Перелік джерел посилання .....	53
Додаток А Лістинг програми .....	55

**ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАК, ОДИНИЦЬ І ТЕРМІНІВ**

БЛ – багатониткова лінійна;

ГТС – газотранспортна система;

ДГ – ділянка газопроводу;

ДТ – ділянка трубопроводу;

КС – компресорна станція;

ММ – математична модель;

НН – нестационарний неізотермічний;

РТГ – режими течії газу;

СН – стаціонарний неізотермічний;

ЕОМ – електронна обчислювальна машина.

## ВСТУП

**Актуальність теми.** У сучасному світі надійність та ефективність роботи газотранспортних систем набуває особливого значення. Забезпечення безперервної та безпечної подачі природного газу є критично важливим для енергетичної безпеки країни та задоволення потреб населення та промисловості. Одним з ключових аспектів у цьому контексті є моделювання нестационарних режимів течії газу, особливо у складних системах, таких як багатониткові лінійні ділянки газопроводів.

Важливість дослідження полягає у забезпеченні точності прогнозування параметрів течії газу, що є вирішальним для планування експлуатації газопроводів, а також для запобігання аварійних ситуацій.

У роботі розглядаються різноманітні аспекти моделювання: від фізичних основ процесів течії газу до використання сучасних комп'ютерних технологій для розрахунків. Значна увага приділяється аналізу існуючих моделей, а також розробці нових підходів, що забезпечують підвищену точність і ефективність моделювання.

Дослідження фокусується на визначенні параметрів, які впливають на нестационарні режими течії газу, включаючи фактори, такі як зміни тиску, температури, обсягу потоку та інших важливих характеристик газопроводу. Відповідно, ця робота вносить важливий вклад у розуміння комплексних процесів, що відбуваються в газотранспортних системах, та розвиток методів їх оптимізації.

Актуальність роботи зумовлена світовими тенденціями енергопереходу, зміною структури споживання енергії та підвищенням вимог до екологічності та економічності енергетичних ресурсів.

Сучасні енергетичні системи стикаються з викликами, пов'язаними з необхідністю забезпечення надійності, ефективності та екологічності енергопостачання. Важливою складовою таких систем є газопроводи, які є критичною інфраструктурою для транспортування природного газу. Оптимізація роботи

газотранспортних систем (ГТС) вимагає ретельного аналізу і моделювання їхньої поведінки, зокрема у нестационарних режимах, що є актуальним напрямком наукових досліджень.

Тема кваліфікаційної роботи є особливо важливою у контексті забезпечення надійності функціонування ГТС. Виклики, що виникають під час експлуатації таких складних систем, включають динамічні зміни тиску, температури та потоків газу, що вимагають високоточних моделей для їх прогнозування та управління.

**Мета і завдання кваліфікаційної роботи.** Метою кваліфікаційної роботи є математичне моделювання нестационарного неізотермічного режиму транспорту газу по багатонитковим лінійними ділянками газопроводу, яке може забезпечити безпеку і надійність газопроводу, ефективність експлуатації в аварійних та нештатних ситуаціях.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати наступні завдання:

- провести огляд і аналіз сучасного стану задачі ММ НН РТГ;
- розглянути існуючі чисельні методи для розв'язання системи рівнянь ММ;
- вибрати ММ НН РТГ по БЛ ДГ;
- обрати метод розв'язання системи рівнянь ММ;
- дослідити метод скінчених різниць з використанням неявної різницевої сітки для чисельного розв'язання системи рівнянь ММ НН РТГ по БЛ ДГ;
- розробити програмний продукт для розрахунку параметрів газового потоку;
- провести аналіз результатів чисельних експериментів.

*Об'єктом дослідження* є НН РТГ по БЛ ДГ.

*Предметом дослідження* є математична модель НН РТГ по БЛ ДГ та чисельний метод розв'язання системи рівнянь ММ.

**Методи дослідження.** У кваліфікаційній роботі використовуються чисельні методи для розв'язання взаємопов'язаних систем диференціальних рівнянь у частинних похідних.

**Публікації.** Результати, отримані у кваліфікаційній роботі, було представлено на II Міжнародної молодіжної науково-практичної конференції англійською мовою «НАВЧАННЯ І ВИКЛАДАННЯ: після війни та під час миру» (м. Харків, 10 листопада 2023 р.) [1], 27-й Міжнародному молодіжному форумі «Радіоелектроніка та молодь у XXI столітті» (м. Харків, 10-12 травня 2023 р.) [2] та VI Міжнародна науково-теоретична конференція «Сучасний стан розвитку світової науки: характеристики та особливості» (Лісабон, Португалія, 15 грудня 2023 р.) [3].

## 1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ДОСЛІДЖЕННЯ

### 1.1 Методи чисельного аналізу нестационарних неізотермічних режимів течії газу по багатонитковим лінійним ділянкам газопроводу

Чисельний аналіз нестационарних неізотермічних режимів течії газу по багатонитковим лінійним ділянкам газопроводу здійснюється з використанням спеціалізованих чисельних методів. Ці методи повинні ефективно обробляти складні фізичні процеси, такі як теплообмін, турбулентність, варіації тиску та густини. Розглянемо деякі із загальноприйнятих методів.

Метод скінченних об'ємів. Для рішення диференціальних рівнянь збереження маси, імпульсу та енергії. FVM забезпечує збереження потоків через контрольні об'єми, що є важливим для точного моделювання переносу речовин та енергії.

Метод скінченних елементів. Цей метод підходить для рішення задач із складними геометріями та граничними умовами. Він часто використовується для аналізу теплового поля в структурах, що оточують газопровід, але також може застосовуватися для самої течії газу.

Метод скінченних різниць. Застосовується для дискретизації просторових похідних у рівняннях збереження. Для нестационарних задач можуть використовуватися імпліцитні або експліцитні схеми часової дискретизації.

Метод характеристик. Іноді використовується для розв'язання гіперболічних частин рівнянь збереження, які описують перенос маси та імпульсу.

Методи розкладу. Для розбиття багатониткової системи на декілька одностикових систем, які можуть бути розв'язані паралельно або послідовно.

Адаптивні сітки. Для оптимізації обчислень і підвищення точності у регіонах з високими градієнтами або турбулентністю можуть використовуватися адаптивні сітки.

При використанні будь-якого з цих методів необхідно враховувати валідацію моделі шляхом порівняння з експериментальними даними або аналітичними розв'язками, якщо такі є. Чисельна стійкість, точність та ефективність обчислень є ключовими чинниками, які визначають придатність обраного методу для конкретної інженерної задачі.

Такі методи можуть бути ефективними для випадку коли ДГ має тільки одну трубу, але для БЛ ДГ цього не достатньо.

Метод скінчених різниць з використанням неявної різницевої сітки є ефективним підходом для чисельного рішення систем рівнянь, які описують НН РТГ у БЛ ДГ. Такий підхід дозволяє розв'язувати рівняння з високою стійкістю до чисельних осциляцій, що важливо при моделюванні режимів з сильною змінністю у часі.

Особливості неявної схеми:

- стійкість: неявні схеми є умовно стійкими, що дозволяє використовувати більші часові кроки, особливо для жорстких задач;
- чисельна ефективність: вона може бути менш ефективною з точки зору обчислень через необхідність розв'язання системи рівнянь на кожному кроці;
- нелінійність: якщо система рівнянь є нелінійною, можуть виникати додаткові труднощі з конвергенцією ітераційних методів.

Використання такого підходу дозволяє отримати детальне уявлення про поведінку газопровідної системи в динаміці, що є ключовим для оптимізації її проектування та експлуатації.

Розглянемо детальніше метод сіток Больцмана та метод скінчених різниць, з використанням неявної різницевої сітки [4].

Метод сіток Больцмана (МСБ) – це клас чисельних алгоритмів для моделювання динаміки рідин і газів, та інших феноменів переносу. Він відрізняється від традиційних методів рішення рівнянь Нав'є-Стокса, таких як методи прямих чисельних симуляцій, методи скінчених елементів, методи скінчених різниць або методи скінчених об'ємів.

МСБ базується на мікроскопічних моделях і кінетичних рівняннях, але дає макроскопічні рівняння Нав'є-Стокса в межі макроскопічних або гідродинамічних лімітів. Він імітує рідину за допомогою ансамблю фіктивних частинок, і відстежує їх розподіл швидкостей на дискретній сітці.

До МСБ входять наступні основні компоненти:

- частинки: в моделі МСБ використовуються частинки, які мають дискретні швидкості та розподіли щільностей у кожному вузлі сітки;
- сітка: сітка зазвичай має просту структуру, таку як квадратну для 2D або кубічну для 3D моделювань (вона визначає можливі напрямки руху частинок);
- розподіл швидкостей: частинки можуть рухатися лише вздовж напрямків, визначених сіткою, та вони мають розподіл швидкостей, який оновлюється на кожному часовому кроці.

Основні кроки МСБ.

Крок 1: Колізія. В кожному вузлі сітки розподіли швидкостей частинок оновлюються на основі певної колізійної моделі (наприклад, Bhatnagar-Gross-Krook модель). Це описує взаємодії між частинками.

Крок 2: Потік. Розподіли швидкостей частинок "перелітають" до сусідніх вузлів сітки відповідно до їх швидкостей.

Крок 3: Граничні умови. Застосовуються відповідні граничні умови, які можуть включати відбиття частинок, їх поглинання або задання фіксованих значень щільностей.

Крок 4: Макроскопічні величини. На основі розподілу швидкостей у кожному вузлі розраховуються макроскопічні величини, такі як щільність та середня швидкість рідини.

Крок 5: Ітерація. Ці кроки повторюються на кожному часовому кроці, забезпечуючи еволюцію системи у часі.

Переваги МСБ:

- простота імплементації, особливо на паралельних обчислювальних системах;

- хороша локальність даних, що ефективна для високопродуктивних обчислень;
- здатність впоратися зі складними граничними умовами та геометрією;
- природна адаптація до моделювання мультифізичних та мультикомпонентних потоків.

Обмеження МСБ:

- необхідність вибору відповідної колізійної моделі;
- обмеженість у застосуванні до високих Махівських чисел (для моделювання стисливих потоків потрібні модифікації);
- труднощі з досягненням правильної термодинамічної поведінки для деяких застосувань.

LBM став популярним інструментом для дослідження складних систем потоків, включаючи турбулентність, міжфазовий перенос, та реактивні потоки.

Метод скінчених різниць (Finite Difference Method, FDM) з використанням неявної різницевої сітки є одним із підходів для чисельного рішення диференціальних рівнянь у частинних похідних (ДРЧП).

Розглянемо деякі з особливостей методу.

Просторова дискретизація: простір, де відбувається процес, розбивається на сітку з вузлами. Кожне просторове рівняння апроксимується різницеvими рівняннями, які пов'язують значення в кожному вузлі з його сусідами.

Часова дискретизація: у неявній схемі, нові значення (на час  $t + \Delta t$ ) вираховуються на основі рівнянь, які включають самі ці невідомі значення. Це відрізняється від експліцитної схеми, де нові значення вираховуються тільки на основі відомих значень на попередньому часовому кроці.

Лінійна або нелінійна система рівнянь: в результаті такої дискретизації формується система лінійних або нелінійних алгебраїчних рівнянь. Для лінійної системи можуть бути застосовані прямі методи рішення (наприклад, метод Гаусса або LU-розкладу). Для нелінійної системи використовуються ітераційні методи (наприклад, метод Ньютона).

Ітераційний розв'язок: через залежність рівнянь від невідомих значень на новому часовому кроці, розв'язання системи вимагає ітераційного процесу.

Стійкість і конвергенція: неявні методи зазвичай стійкі незалежно від розміру часового кроку, але для забезпечення конвергенції потрібна правильна формулювання ітераційного процесу.

Втім, запропонований метод має свої переваги та недоліки.

До переваг можна віднести:

- висока стійкість, особливо для жорстких задач;
- можливість використання великих часових кроків без втрати стабільності;
- здатність ефективно обробляти крайові умови.

Також у методу є наступні недоліки:

- більш високі вимоги до обчислювальних ресурсів, оскільки на кожному кроці необхідно розв'язувати систему рівнянь;
- іноді важче впровадити на практиці порівняно з експліцитними методами, особливо для складних або нелінійних задач;
- потребує ітераційних або прямих рішень для кожного часового кроці, що може бути часозатратним для великих систем.

Алгоритм застосування методу скінчених різниць для рішення диференціальних рівнянь у частинних похідних можна описати наступним чином [3].

Крок 1: Постановка задачі.

Описати початкові ДРЧП, включаючи початкові та граничні умови.

Крок 2: Дискретизація області. Розбити область, у якій визначено ДРЧП, на дискретну мережу або сітку, вибравши відповідні кроки  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  (та  $\Delta z$  для тривимірних задач) у кожному просторовому напрямку і  $\Delta t$  для часу.

Крок 3: Формулювання різницевих рівнянь. Замінити неперервні просторові похідні різницевиими виразами, що апроксимують похідні в кожному вузлі сітки.

Для нестационарних задач необхідно замінити часові похідні відповідними різницевиими виразами, використовуючи експліцитні або неявні схеми.

Крок 4: Складання системи алгебраїчних рівнянь. Сформувати систему алгебраїчних рівнянь на основі різницевих рівнянь для всіх внутрішніх вузлів сітки.

Крок 5: Врахування граничних умов. Ввести відповідні граничні умови до системи рівнянь, щоб забезпечити її замкнутість.

Крок 6: Розв'язання системи рівнянь. Вибрати і виконати метод розв'язання системи алгебраїчних рівнянь. Це може бути прямий розв'язок (для лінійних систем) або ітераційний (для нелінійних систем або великих лінійних систем).

Крок 7: Ітерація по часу. Для нестационарних задач ітерувати через часові кроки, оновлюючи значення в кожному вузлі відповідно до часової схеми до тих пір, поки не буде досягнутий кінцевий час моделювання або стаціонарний стан.

Крок 8: Аналіз та верифікація. Проаналізувати розрахункові дані, порівняти їх з експериментальними даними або аналітичними розв'язками, якщо такі є, для перевірки точності моделі.

Крок 9: Пост-обробка. Виконати пост-обробку отриманих результатів, включаючи візуалізацію, для представлення фізичних явищ у зручній формі.

Цей алгоритм може бути адаптований та деталізований для конкретних типів ДРЧП, таких як рівняння теплопровідності, рівняння Нав'є-Стокса, рівняння переносу та інші, з урахуванням специфіки кожного фізичного процесу та чисельного методу, який застосовується для його рішення.

Неявні методи скінчених різниць використовуються в багатьох областях інженерії, включаючи моделювання нестационарних течій в газопроводах, теплопередачу, динаміку рідин, механіку ґрунтів і порід, та інші. Їх можна використовувати для моделювання процесів, де динаміка змін в часі є критичним фактором, а висока стійкість і точність є необхідними.

У контексті нестационарних задач, таких як течія газу по багатонитковій лінійній ділянці газопроводу, використання неявної схеми дозволяє досягти високої стійкості чисельного рішення навіть при великих кроках за часом. Це особливо корисно для довготривалих симуляцій, де експліцитні схеми вимагали б дуже маленьких часових кроків для забезпечення стійкості.

## 1.2 Змістовна та формальна постановка задачі

Об'єктом дослідження – НН РТГ по БЛ ДГ.

Предметом дослідження є математична модель НН РТГ по БЛ ДГ та чисельні методи розв'язку системи рівнянь ММ.

Метою роботи є математичне моделювання нестационарного неізотермічного режиму транспорту газу по багатонитковим лінійними ділянками газопроводу (БЛ ДГ), яке може забезпечити безпеку і надійність газопроводу, ефективність експлуатації в аварійних та нештатних ситуаціях.

Розглядаємо БЛ ДГ, яка складається з декількох ділянок трубопроводу заданої довжини та діаметру, які прокладені паралельно. На границях ділянки задається тиск або масова витрата газу, та температура газу, що поступає на ДГ. На границях ділянки здійснюється різка зміна граничних умов, яка пов'язана з аварійною або нештатною ситуацією. Необхідно оцінити параметри газового потоку за певний час.

В загальному випадку газотранспортна мережа зазвичай об'єднує кілька компресорних станцій, з'єднаних між собою лінійними ділянками, що складаються з однієї або кількох паралельно прокладених трубопроводів.

В роботі розглядається БЛ ДГ, яка має два вузла, які позначимо 1 та 2, де 1 та 2 – це вхід та вихід ДГ відповідно, та  $m$  ділянок трубопроводу довжиною  $L^i$  та діаметром  $D^i$ ,  $i = \overline{1, m}$ , які йдуть з вузла 1 до вузла 2. На рисунку 1.1 схематично зображено БЛ ДГ, на якому 1 – вхід, 2 – вихід.

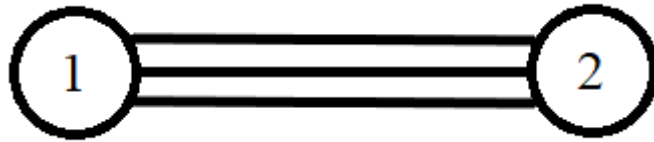


Рисунок 1.1 – Багатониткова лінійна ділянка газопроводу

Вважаємо, що режим течії газу по БЛ ДГ нестационарний та неізотермічний, через різкі зміни граничних умов на границях ДГ.

Параметри газового потоку на кожній  $i$ -й ДТ ( $i = \overline{1, m}$ ) можна описати за допомогою функцій  $G^i(x, t)$ ,  $P^i(x, t)$ ,  $T^i(x, t)$  – масової витрати, тиску та температури газу, як функцій часу, що задані в області

$$\Lambda^i = \{(x, t), x \in [0, L^i], t \in [0, T_{\max}]\},$$

де  $T_{\max}$  – кінцевий час процесу, що розглядається.

На вході будемо мати заданий тиск та температуру газу, а на виході масову витрату газу.

Розглянемо граничні умови, для першого вузла:

$$\begin{cases} P_{\text{вуз}}^{(1)}(t) = P^{(1)}(t), \\ T_{\text{вуз}}^{(1)}(t) = T^{(1)}(t), \end{cases} \quad (1.1)$$

для другого вузла:

$$G_{\text{вуз}}^{(2)}(t) = G^{(2)}(t), \quad (1.2)$$

де  $P^{(1)}(t)$ ,  $T^{(1)}(t)$ ,  $G^{(2)}(t)$  – задані функції;

$G_{\text{вуз}}^{(2)}(t)$  – масова витрата у другому вузлі;

$P_{\text{вуз}}^{(1)}(t)$ ,  $T_{\text{вуз}}^{(1)}(t)$  – тиск і температура у першому вузлі.

Крім того, вважаємо, що задані початкові умови:

$$G^i(x,0) = G_0^i(x,0), P^i(x,0) = P_0^i(x,0), T^i(x,0) = T_0^i(x,0), x \in [0, L^i], i = \overline{1, m}, \quad (1.3)$$

де  $G_0^i(x,0)$ ,  $P_0^i(x,0)$ ,  $T_0^i(x,0)$  – задані функції,  $i = \overline{1, m}$ .

Для розрахунку нестационарного неізотермічного режиму транспорту газу по БЛ ДГ необхідно знати початковий розподіл параметрів газового потоку. В якості такого розподілу береться стаціонарний розподіл.

### 1.3 Постановка задач дослідження

Поставлена мета роботи передбачає наступні задачі:

- провести огляд і аналіз сучасного стану задачі ММ НН РТГ;
- розглянути існуючі чисельні методи для розв'язання системи рівнянь ММ;
- вибрати математичну модель нестационарних неізотермічних режимів течії газу по БЛ ДГ;
- обрати метод розв'язання системи рівнянь ММ;
- дослідити метод скінчених різниць, з використанням неявної різницевої сітки для чисельного розв'язання системи рівнянь ММ НН РТГ по БЛ ДГ;
- розробити програмний продукт для розрахунку параметрів газового потоку;
- провести аналіз результатів чисельних експериментів.

## 2 ВИБІР ТА ОБҐРУНТУВАННЯ МЕТОДУ РОЗВ'ЯЗАННЯ

### 2.1 Математична модель нестационарних неізотермічних режимів течії газу по багатонитковим лінійним ділянкам газопроводу

Моделювати структуру БЛ ДГ будемо за допомогою орієнтованого графу, який має дві вершини, які позначимо 1 та 2, де 1 та 2 – це вхід та вихід ДГ відповідно, та  $m$  дуг відповідних  $m$  ділянкам трубопроводу (Д1) довжиною  $L^i$  та діаметром  $D^i$ ,  $i = \overline{1, m}$ , які йдуть з вузла 1 до вузла 2. Тоді математична модель нестационарного неізотермічного режиму течії газу по БЛ ДГ заданої структури матиме вигляд [2, 3, 5, 6]:

$$\frac{\partial \varphi^i(x,t)}{\partial t} + B^i(x,t, \varphi^i(x,t)) \frac{\partial \varphi^i(x,t)}{\partial x} = \Phi^i(x,t, \varphi^i(x,t)), \quad i = \overline{1, m}, \quad (2.1)$$

де за визначні параметри беруться  $G^i(x,t)$ ,  $P^i(x,t)$ ,  $T^i(x,t)$  – масова витрата, тиск, температура на  $i$ -й ділянці трубопроводу, тобто  $\varphi^i(x,t) = (G^i(x,t), P^i(x,t), T^i(x,t))$ ,  $i = \overline{1, m}$ ,  $\alpha = zgR$ ,

$$B^i(x,t, \varphi^i) = \begin{bmatrix} 2\alpha \frac{T^i G^i}{P^i S^i} & S^i - \alpha \frac{T^i (G^i)^2}{S^i (P^i)^2} & 0 \\ \alpha \frac{T^i}{S^i} & 0 & 0 \\ \alpha(\gamma - 1) \frac{(T^i)^2}{P^i S^i} & 0 & \alpha\gamma \frac{T^i G^i}{P^i S^i} \end{bmatrix},$$

$$\Phi^i(x, t, \varphi^i(x, t)) = \begin{bmatrix} -\lambda^i \alpha \frac{T^i G^i |G^i|}{2D^i P^i S^i} - \frac{P^i S^i}{\alpha T^i} g \frac{dh^i}{dx} \\ 0 \\ -4(\gamma - 1) \frac{K}{D^i} \frac{T^i}{P^i} (T^i - T_{2p}) - (\gamma - 1) \frac{T^i G^i}{P^i S^i} g \frac{dh^i}{dx} \end{bmatrix}.$$

Умови узгодження в вузлах БЛ ДГ мають вигляд:

$$\sum_{i=1}^m G^i(0, t) = G_{\text{вуз}}^{(1)}(t), \quad (2.2)$$

$$P^i(0, t) = P_{\text{вуз}}^{(1)}(t), \quad i = \overline{1, m}, \quad (2.3)$$

$$\sum_{i=1}^m G^i(L^i, t) = G_{\text{вуз}}^{(2)}(t), \quad (2.4)$$

$$P^i(L^i, t) = P_{\text{вуз}}^{(2)}(t), \quad i = \overline{1, m}, \quad (2.5)$$

$$T^i(0, t) = T_{\text{вуз}}^{(1)}(t), \quad \text{якщо } G^i(0, t) > 0, \quad i = \overline{1, m}, \quad (2.6)$$

$$T^i(L^i, t) = T_{\text{вуз}}^{(2)}(t), \quad \text{якщо } G^i(L^i, t) < 0, \quad i = \overline{1, m}, \quad (2.7)$$

де  $G_{\text{вуз}}^{(1)}(t)$ ,  $G_{\text{вуз}}^{(2)}(t)$  – масова витрата у відповідному вузлі;

$P_{\text{вуз}}^{(1)}(t)$ ,  $P_{\text{вуз}}^{(2)}(t)$  – тиск у відповідному вузлі;

$T_{\text{вуз}}^{(1)}(t)$ ,  $T_{\text{вуз}}^{(2)}(t)$  – температура у відповідному вузлі.

Системи квазілінійних диференціальних рівнянь у частинних похідних (2.1) та умови узгодження (2.2) – (2.7) доповнюється граничними умовами, які задаються співвідношеннями (1.1) – (1.2), та початковими умовами, які задаються співвідношеннями (1.3). Таким чином, отримаємо взаємопов'язані системи квазілінійних диференціальних рівнянь у частинних похідних разом з початковими і граничними умовами.

## 2.2 Метод скінчених різниць з використанням неявної різницевої сітки

Метод скінчених різниць базується на побудові дискретної просторово-часової сітки, заміні континуальних похідних у початкових диференціальних рівняннях на еквівалентні їм скінченно-різницеві вирази і в перегрупованні членів отриманих алгебраїчних рівнянь для побудови алгоритму їх вирішення, що реалізується на комп'ютері з мінімальними витратами ресурсів [5, 7, 8].

Апроксимація рівнянь системи проводиться за неявною скінченно-різницевою схемою, визначеною на чотири-точковому шаблоні, рисунок 2.1 [5, 7, 8].

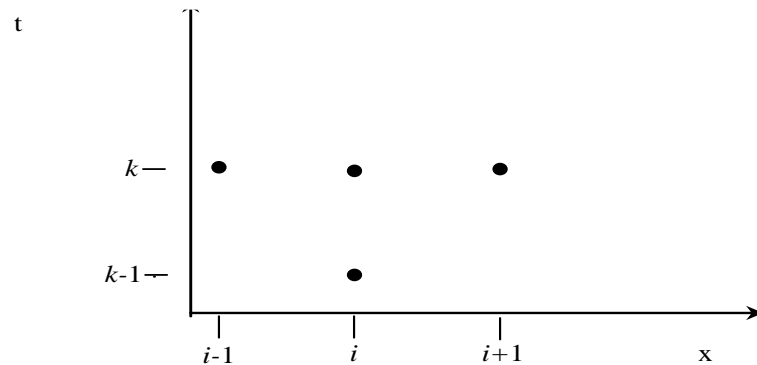


Рисунок 2.1 – Неявна скінченно-різницева схема для проміжної  $i$ -ї точки

Для отримання чисельного рішення системи (2.1) – (2.7) розіб'ємо відрізок  $[0, L_i]$  для кожної  $i$ -ї ДТ ( $i = \overline{1, m}$ ), на  $N_i$  частин, а інтервал часу  $[0, T_{\max}]$  на  $K = T_{\max} / \Delta t$  часових шарів, де  $T_{\max}$  – інтервал часу, на якому проводиться розрахунок НН РТГ.

Розглянемо застосування розглянутого методу до вирішення ДРЧП (2.1) – (2.7) для БЛ ДГ.

Позначимо крок за просторовою координатою за  $\Delta$ , крок за часовою координатою за  $\tau$ ,  $N_i$  – кількість частин, на які розбивається  $i$ -а ділянка.

Позначимо також значення режимних параметрів у вузлах  $i$ -ї ділянки наступним чином:

$$G^i(j \cdot \Delta, k \cdot \tau) = G_j^{k,i},$$

$$P^i(j \cdot \Delta, k \cdot \tau) = P_j^{k,i},$$

$$T^i(j \cdot \Delta, k \cdot \tau) = T_j^{k,i},$$

$$\varphi_j^{k,i} = (G_j^{k,i}, P_j^{k,i}, T_j^{k,i}), \quad j = \overline{0, N_i}, \quad k = \overline{0, K}, \quad i = \overline{1, m}.$$

Знайдемо вирази для похідних  $\left. \frac{\partial \varphi^i}{\partial t} \right|_j^k$  та  $\left. \frac{\partial \varphi^i}{\partial x} \right|_j^k$  з використанням неявної

скінченно-різницевої схеми. Похідні для  $i$ -ї ДТ ( $i = \overline{1, m}$ ) замінюються наступними співвідношеннями:

$$\left. \frac{\partial \varphi^i}{\partial t} \right|_j^k = \frac{\varphi_j^{k,i} - \varphi_j^{(k-1),i}}{\tau}, \quad j = \overline{0, N_i}, \quad (2.8)$$

$$\left. \frac{\partial \varphi^i}{\partial x} \right|_j^k = \begin{cases} \frac{\varphi_1^{k,i} - \varphi_0^{k,i}}{\Delta}, & j = 0, \\ \frac{\varphi_{j+1}^{k,i} - \varphi_{j-1}^{k,i}}{2\Delta}, & j = \overline{1, N_i - 1}, \\ \frac{\varphi_{N_i}^{k,i} - \varphi_{N_i-1}^{k,i}}{\Delta}, & j = N_i. \end{cases} \quad (2.9)$$

Тоді рівняння (2.1) для внутрішніх точок лінійної ділянки записується наступним чином:

$$\frac{\varphi_j^{k,i} - \varphi_j^{(k-1),i}}{\tau} + B_j^{k,i} \frac{\varphi_{j+1}^{k,i} - \varphi_{j-1}^{k,i}}{2\Delta} = \Phi_j^{k,i}, \quad j = \overline{1, N_i - 1},$$

або

$$\frac{1}{\tau} \varphi_j^{k,i} - \frac{1}{\tau} \varphi_j^{(k-1),i} + \frac{1}{2\Delta} B_j^{k,i} \varphi_{j+1}^{k,i} - \frac{1}{2\Delta} B_j^{k,i} \varphi_{j-1}^{k,i} = \Phi_j^{k,i}, \quad j = \overline{1, N_i - 1}. \quad (2.10)$$

Аналогічно для точок 0 і  $N_i$  рівняння має вигляд:

$$\left( \frac{1}{\tau} - \frac{1}{\Delta} B_0^{k,i} \right) \varphi_0^{k,i} - \frac{1}{\tau} \varphi_0^{(k-1),i} + \frac{1}{\Delta} B_0^{k,i} \varphi_1^{k,i} = \Phi_0^{k,i}, \quad (2.11)$$

$$\left( \frac{1}{\tau} - \frac{1}{\Delta} B_{N_i}^{k,i} \right) \varphi_{N_i}^{k,i} - \frac{1}{\tau} \varphi_{N_i}^{(k-1),i} + \frac{1}{\Delta} B_{N_i}^{k,i} \varphi_{N_i-1}^{k,i} = \Phi_{N_i}^{k,i}. \quad (2.12)$$

Ці системи, зважаючи на граничні умови (1.1) – (1.2), доповнюються умовами узгодження

$$P_0^{k,i} = P^{(1)}(k \cdot \tau), \quad i = \overline{1, m}, \quad (2.13)$$

$$\sum_{i=1}^m G_{N_i}^{k,i} = G^{(2)}(k \cdot \tau), \quad (2.14)$$

$$P_{N_i}^{k,i} = P_{N_m}^{k,m}, \quad i = \overline{1, m-1}, \quad (2.15)$$

$$T_0^{k,i} = T^{(1)}(k \cdot \tau). \quad (2.16)$$

Таким чином, отримано систему нелінійних алгебраїчних рівнянь.

Розв'язок системи рівнянь (2.10) – (2.16) це вектор

$$\begin{aligned} \varphi^k &= (\varphi_0^{k,1}, \dots, \varphi_{N_1}^{k,1}, \dots, \varphi_0^{k,m}, \dots, \varphi_{N_m}^{k,m}) = \\ &= (G_0^{k,1}, P_0^{k,1}, T_0^{k,1}, \dots, G_{N_1}^{k,1}, P_{N_1}^{k,1}, T_{N_1}^{k,1}, \dots, G_0^{k,m}, P_0^{k,m}, T_0^{k,m}, \dots, G_{N_m}^{k,m}, P_{N_m}^{k,m}, T_{N_m}^{k,m}). \end{aligned}$$

Дана система, яка включає рівняння (2.10) – (2.16) для ДГ може бути вирішена методом Ньютона.

Отримана в результаті лінійна система для рівнянь (2.10) – (2.12) для  $k$ -го часового шару та  $s$ -ї ітерації записується в наступному вигляді:

$$\left[ \frac{\partial \psi^{k,i}}{\partial \varphi_0^{k,i}} \right]_{\varphi^{k,(s-1)}} \delta \varphi_0^{k,s,i} + \frac{1}{\Delta_i} B_0^{k,(s-1),i} \delta \varphi_1^{k,s,i} = \psi_0^{k,(s-1),i} \quad (2.17)$$

$$\begin{aligned} -\frac{1}{2\Delta_i} B_j^{k,(s-1),i} \delta \varphi_{j-1}^{k,s,i} + \left[ \frac{\partial \psi^{k,i}}{\partial \varphi_j^{k,i}} \right]_{\varphi^{k,(s-1)}} \delta \varphi_j^{k,s,i} + \frac{1}{2\Delta_i} B_j^{k,(s-1),i} \delta \varphi_{j+1}^{k,s,i} = \\ = \psi_j^{k,(s-1),i}, \quad j = \overline{1, N_i - 1}, \end{aligned} \quad (2.18)$$

$$\left[ \frac{\partial \psi^{k,i}}{\partial \varphi_{N_i}^{k,i}} \right]_{\varphi^{k,(s-1)}} \delta \varphi_{N_i}^{k,s,i} + \frac{1}{\Delta_i} B_{N_i}^{k,(s-1),i} \delta \varphi_{N_i-1}^{k,s,i} = \psi_{N_i}^{k,(s-1),i}, \quad i = \overline{1, m}, \quad (2.19)$$

де  $\delta \varphi_0^{k,s,i}, \dots, \delta \varphi_{N_i}^{k,s,i}$  – компоненти вектору поправок до невідомих змінних;

$\psi_0^{k,(s-1),i}, \dots, \psi_{N_i}^{k,(s-1),i}$  – компоненти вектору нев'язок;

$\left[ \frac{\partial \psi^{k,i}}{\partial \varphi_0^{k,i}} \right]_{\varphi^{k,(s-1)}}, \dots, \left[ \frac{\partial \psi^{k,i}}{\partial \varphi_{N_i}^{k,i}} \right]_{\varphi^{k,(s-1)}}$  – елементи матриці Якобі  $\left[ \frac{\partial \psi^k}{\partial \varphi^k} \right]_{\varphi^{k,s-1}}$  ;

$i$  – номер  $i$ -ї ділянки,  $i = \overline{1, m}$ .

Враховуючи граничні умови на початку ділянок, покладемо для  $s = 0$ .

$$P_0^{k,0,i} = P^{(1)}(k \cdot \tau), \quad i = \overline{1, m},$$

$$T_0^{k,0,i} = T^{(1)}(k \cdot \tau), \quad i = \overline{1, m}.$$

Тоді, враховуючи граничні умови на початку та на кінці ділянок, умови узгодження (2.17) – (2.19) приймають вид

$$\delta P_0^{k,s,i} = 0, \quad i = \overline{1, m}, \quad (2.20)$$

$$\sum_{i=1}^m \delta G_{N_i}^{k,s,i} = G^{(2)}(k \cdot \tau) - G^{(2)}((k-1) \cdot \tau), \quad (2.21)$$

$$\delta P_{N_i}^{k,s,i} = \delta P_{N_m}^{k,s,m}, \quad i = \overline{1, m-1}, \quad (2.22)$$

$$\delta T_0^{k,s,i} = 0, \quad i = \overline{1, m}. \quad (2.23)$$

Значення параметрів на нульовому часовому шарі ( $k=0$ ) беруться з початкового розподілу

$$G_j^{0,i} = G_0^i(j \cdot \Delta, 0), \quad P_j^{0,i} = P_0^i(j \cdot \Delta, 0), \quad T_j^{0,i} = T_0^i(j \cdot \Delta, 0), \quad j = \overline{0, N_i}, \quad i = \overline{1, m}. \quad (2.24)$$

Для знаходження рішення системи (2.17) – (2.23) зробимо низку перетворень. В рівняннях (2.17) замінюємо друге та третє рівняння на рівняння (2.20) та (2.23) для кожної ділянки. В рівняннях (2.19) замінюємо друге рівняння на рівняння (2.22) для кожної ділянки  $i$ -ї ділянки,  $i = \overline{1, m-1}$ . В рівняннях (2.19) для  $m$ -ї ділянки замінюємо перше рівняння на рівняння (2.21).

Отримана система лінійних рівнянь для  $k$ -го часового шару та  $s$ -ї ітерації вирішується щодо векторів поправок до невідомих  $\delta \varphi_0^{k,s,i}, \dots, \delta \varphi_{N_i}^{k,s,i}, \quad i = \overline{1, m}$ .

Далі розраховуються значення параметрів газового потоку на даній  $s$ -ї ітерації за формулою

$$\varphi_j^{k,s,i} = \varphi_j^{k,(s-1),i} - \delta \varphi_j^{k,s,i}, \quad j = \overline{0, N_i}, \quad i = \overline{1, m}. \quad (2.25)$$

Таким чином, алгоритм розрахунку НН РТГ по ДГ для  $k$ -го часового шару має вигляд:

- а) обчислення вектору нев'язок для БЛ ДГ;
- б) розрахунок матриці Якобі для БЛ ДГ;
- в) побудова системи лінійних алгебраїчних рівнянь (2.17) – (2.19) та її коригування з урахуванням умов узгодження та граничних умов (2.20) – (2.23);

г) визначення вектору поправок до невідомих шляхом розв'язання перетвореної лінійної системи;

г) обчислення нових значень невідомих параметрів газового потоку на  $s$ -й ітерації для БЛ ДГ за формулою (2.25);

д) перевірка збіжності  $\left\| \psi^{k,(s-1),i} \right\| \leq \varepsilon$ , де  $\varepsilon$  – задана точність. Якщо точність не досягнуто, то перехід до п.1, інакше алгоритм закінчує свою роботу.

Перевага даного алгоритму над іншими у тому, що його збіжність не залежить від вибору параметрів  $\Delta$  і  $\tau$ , що дозволяє значно скоротити час розрахунку за допомогою ЕОМ НН РТГ по БЛ ДГ.

## Висновки за розділом 2

У другому розділі даної кваліфікаційної роботи було обрано математичну модель нестационарних неізотермічних РТГ по БЛ ДГ. Побудовано метод розв'язання взаємопов'язаної системи квазілінійних диференціальних рівнянь у частинних похідних, який використовує метод скінченних різниць з використанням неявної скінченно-різницевої сітки. Запропоновані перетворення, які дозволяють розв'язати лінійну систему рівнянь, отриману після застосування методу Ньютона до нелінійної системи. Розроблено алгоритм, що дозволяє реалізувати відповідний метод за допомогою ЕОМ та проаналізувати отримані результати.

### 3 ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ

#### 3.1 Система комп'ютерної алгебри Mathematica 13.1

Для вирішення завдання моделювання стаціонарного (СНРТГ) та нестаціонарного неізотермічного режиму течії газу по багатонитковій лінійній ділянці газопроводу була створена програма в математичному пакеті Mathematica 13.1, лістинг якої розміщено у додатку А.

Wolfram Mathematica є передовою системою комп'ютерної алгебри, широко використовуваною у наукових, інженерних, математичних та обчислювальних сферах. Цей потужний інструмент поєднує в собі чисельні та символні обчислення, що робить його незамінним для вирішення складних математичних задач. Mathematica відома своєю здатністю до виконання алгоритмічних обчислень, графічного моделювання, а також обробки даних та автоматизованої візуалізації.

Система має розширений набір інструментів для символного обчислення, зокрема для розв'язання рівнянь, інтеграції, диференціювання, обробки лінійної алгебри та інших математичних операцій. Mathematica також включає різноманітні графічні можливості, такі як 2D та 3D графіки, анімації, інтерактивні візуалізації, що дозволяють наглядно представляти складні дані та математичні структури.

Wolfram Mathematica також є винятково ефективною для моделювання складних інженерних та фізичних процесів, зокрема для моделювання нестаціонарного неізотермічного режиму транспорту газу по багатонитковій лінійній ділянці газопроводу. Завдяки своїй здатності виконувати точні чисельні обчислення та комплексний аналіз, Mathematica дозволяє користувачам виконувати детальні симуляції фізичних та хімічних процесів, що відбуваються при транспортуванні газу.

Це включає можливість моделювати зміни тиску, температури, щільності газу та інших важливих параметрів у реальному часі та в умовах різних

обмежень. Mathematica забезпечує потужні інструменти для візуалізації цих процесів, що дозволяє інженерам та дослідникам глибше зрозуміти динаміку руху газу і вплив різних факторів на транспортування.

### 3.2 Опис задачі моделювання нестационарного неізотермічного процесу транспорту газу по багатонитковій лінійній ділянці газопроводу

В роботі розглядається БЛ ДГ, яка має два вузла, які позначимо 1 та 2, де 1 та 2 – це вхід та вихід ДГ відповідно, та  $m(m=1,2,3)$  ниток-ділянок трубопроводу з однаковими параметрами та довжиною  $L^i = 33$  км та діаметром  $D^i = 1200$  мм,  $i = \overline{1, m}$ , які йдуть з вузла 1 до вузла 2. На рисунку 3.1 схематично зображено БЛ ДГ, на якому 1 – вхід, 2 – вихід.

Вважаємо, що режим течії газу по БЛ ДГ нестационарний та неізотермічний, через різкі зміни граничних умов на границях БЛ ДГ.

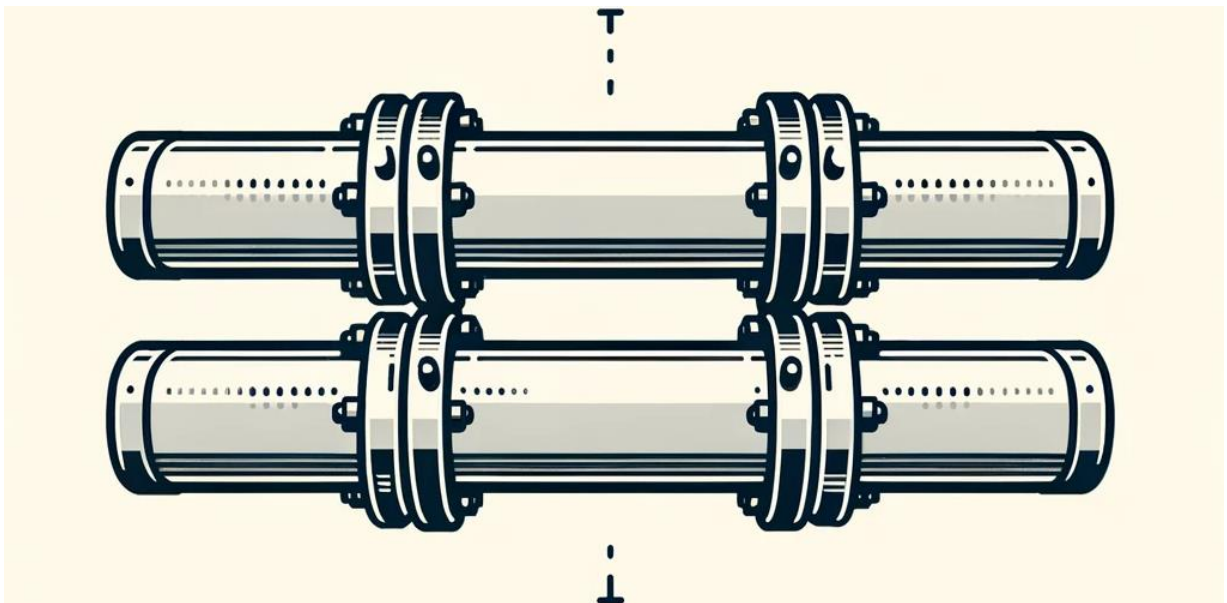


Рисунок 3.1 – Багатониткова лінійна ділянка газопроводу

Параметри газового потоку на кожній  $i$ -й ДТ ( $i = \overline{1, m}$ ) можна описати за допомогою функцій  $G^i(x, t)$ ,  $P^i(x, t)$ ,  $T^i(x, t)$  – масової витрати, тиску та температури газу, як функцій часу, що задані в області

$$\Lambda^i = \{(x, t), x \in [0, L^i], t \in [0, T_{\max}]\},$$

де  $T_{\max} = 12$  годин – кінцевий час процесу, що розглядається.

Як початкові умови для обчислювального експерименту, на вході встановили тиск  $P_{\text{ввз}}^{(1)}(t) = 83.6$  ат. та температуру газу  $T_{\text{ввз}}^{(1)}(t) = 39.1$  °С, а на виході масову витрату газу  $G_k^{(2)}(t) = 102.4$  млн. м<sup>3</sup>/добу.

Задані фізичні параметри газового потоку:

- $z_H = 0.9$  – коефіцієнт стисливості газу;
- $k_T = 1.4$  ккал/м<sup>3</sup> ч. К – коефіцієнт теплопередачі від труби до ґрунту;
- $C_p = 0.655952$  ккал/кг · К – щільна теплоємність газу;
- $\Delta = 0.604707$  – відносна щільність газу по повітрю.

Задані технічні параметри ниток-ділянок трубопроводу:

- $D^i = 1200$  мм – внутрішній діаметр ділянки газопроводу;
- $\delta = 10$  мм – товщина стінок труби;
- $E = 0.95$  – коефіцієнт ефективності ділянки;
- $\alpha = 1$  – поправочний коефіцієнт, який враховує відхилення режиму течії газу від квадратичного;
- $\phi = 1$  – коефіцієнт, який враховує вплив підкладних кілець.

Задаємо точність розрахунку –  $\varepsilon = 10^{-6}$ , крок дискретизації по часу –  $\Delta t = 300$  сек.

Необхідно провести розрахунок стаціонарного неізотермічного і нестаціонарного неізотермічного режиму течії газу по багатонитковій лінійній ділянці газопроводу, побудувати графіки розподілу параметрів газового

поток (тиску, витрати і температури) від часу і провести якісний аналіз результатів розрахунку таких режимів.

### 3.3 Опис програми

Програмний продукт реалізує алгоритм розрахунку СН РТГ та НН РТГ по БЛ ДГ.

Залежно від вхідних даних, що задаються користувачем, програма дозволяє розрахувати наступні режими для досліджуваної лінійної ділянки:

а) стаціонарний неізотермічний режим транспорту газу за стаціонарною моделлю. Отримані результати можуть бути досліджені окремо, а також є початковим розподілом розрахунку нестаціонарного режиму;

б) нестаціонарний неізотермічний режим транспорту газу за нестаціонарною моделлю (для випадків, коли наприкінці БЛ ДГ спостерігається різка зміна граничних умов).

Для розрахунку СН РТГ необхідно встановити фізичні параметри природного газу, технічні параметри ДГ, а також кількість точок розбиття ділянки та точність розрахунку.

Результатом моделювання СН РТГ по БЛ ДГ є виведення таблиці з параметрами газового потоку в кожній з точок розбиття кожної ділянки і побудова графіків, що відображають характер зміни параметрів від точки до точки.

Для розрахунку НН РТГ необхідний попередній розрахунок СН РТГ, оскільки його результати є початковим розподілом для моделювання даного режиму. Додатково необхідно запровадити загальний час моделювання, крок за часом, граничні умови на кінці БЛ ДГ.

Результатом роботи програми з моделювання НН РТГ по БЛ ДГ є виведення параметрів газового потоку на кожному з часових шарів і побудова графіків, що відображають характер зміни параметрів у кожній з точок розбиття ділянки з часом.

### Висновки за розділом 3

У третьому розділі даної кваліфікаційної роботи описано переваги і можливості системи комп'ютерної алгебри Mathematica та обрано ПЗ за допомогою якого буде проведений розрахунок. Поставлена задача дослідження з конкретними умовами для моделювання НН РТГ по БЛ ДГ з різними параметрами (кількість точок розбиття та кількість лінійних ДГ). Описано програму розрахунку ММ НН РТГ по БЛ ДГ, яка дозволяє проводити аналіз та прогнозування динаміки РТГ по БЛ ДГ.

## 4 РЕЗУЛЬТАТИ ОБЧИСЛЮВАЛЬНОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ ТА ЇХ АНАЛІЗ

### 4.1 Обчислювальний експеримент для стаціонарного режиму течії газу по багатонитковій лінійній ділянці газопроводу

В роботі розглядається БЛ ДГ, яка має  $m$  ниток-ділянок трубопроводу ( $m = 1, 2, 3$ ) з однаковими параметрами та різною кількістю точок розбиття кожної ділянки  $n_1 = 5$ ,  $n_2 = 10$ ,  $n_3 = 15$ .

Розрахунок невідомих параметрів стаціонарного режиму течії газу по нестационарній моделі для кожній нитці-ділянці трубопроводу при  $n_2 = 10$ ,  $m = 1, 2, 3$  на останньому 144-у часовому шарі наведено в табл. 4.1 – 4.3.

Порівняння отриманих результатів, а саме значень параметрів на останньому часовому шарі при  $n_i$ ,  $i = 1, 2, 3$  у другому вузлі БЛ ДГ при різній кількості ниток трубопроводу у БЛ ДГ наведено у табл. 4.4.

Таблиця 4.1 – Параметри стаціонарного режиму течії газу по  $i$ -й нитці  
трубопроводу при  $n_1 = 10$  і  $m = 1$  на 144-у часовому шарі

Точка розбиття	Комер. витрата газу $q^i$ (млн м <sup>3</sup> /добу)	Тиск $P^i$ (атм)	Температура $T^i$ (°C)
0	102,4	83, 6	39,1
1	102,4	82,2608945	38,85164
2	102,4	80,8802569	38,6071887
3	102,4	79,496831	38,3630041
...	...	...	...
8	102,4	72,1357065	37,1782695
9	102,4	70,5855604	36,9461884
10	102,4	68,9841624	36,7180048

Таблиця 4.2 – Параметри стаціонарного режиму течії газу по  $i$ -й нитці трубопроводу при  $n_1 = 10$  і  $m = 2$  на 144-у часовому шарі

Точка розбиття	Комер. витрата газу $q^i$ (млн м <sup>3</sup> /добу)	Тиск $P^i$ (атм)	Температура $T^i$ (°C)
0	51,2	83,6	39,1
1	51,2	83,2695046	38,6041737
2	51,2	82,9374383	38,1228296
3	51,2	82,6053159	37,6434474
...	...	...	...
8	51,2	80,9295201	35,3838715
9	51,2	80,5920613	34,3905365
10	51,2	80,2529591	34,5315156

Таблиця 4.3 – Параметри стаціонарного режиму течії газу по  $i$ -й нитці трубопроводу при  $n_1 = 10$  і  $m = 3$  на 144-у часовому шарі

Точка розбиття	Комер. витрата газу $q^i$ (млн м <sup>3</sup> /добу)	Тиск $P^i$ (атм)	Температура $T^i$ (°C)
0	34,133	83,6	39,1
1	34,133	83,4537534	38,3582369
2	34,133	83,3076902	37,6468436
3	34,133	83,1615997	36,9415477
...	...	...	...
8	34,133	82,4323506	33,7086453
9	34,133	82,2865386	33,1019601
10	34,133	82,1408963	32,5248545

Таблиця 4.4 – Порівняння отриманих значень невідомих у другому вузлі при витраті по нитці  $q^i$  на 144-у часовому шарі при різних  $n_i$  та різної кількості ниток  $m$

Кількість ниток	Кількість точок $n_i$	Комер. витрата $q^i$ (млн м <sup>3</sup> /добу)	Тиск $P_{\text{гвз}}^{(1)}(t)$ (атм)	Температура $T_{\text{гвз}}^{(2)}$ (°C)
$m=1$	5	102,4	69,0323654	36,7216029
	10	102,4	68,9841624	36,7180048
	15	102,4	68,9851359	36,7183121
$m=2$	5	51,2	80,2545761	34,5438493
	10	51,2	80,2529591	34,5315156
	15	51,2	80,2530675	34,5322511
$m=3$	5	34,133	82,1407298	32,548907
	10	34,133	82,1408963	32,5248545
	15	34,133	82,1408442	32,5256208

Аналіз отриманих результатів показує, що при стаціонарному режимі течії газу для фіксованої кількості ниток трубопроводу, якщо брати кількість точок розбиття  $n_1=5$ ,  $n_2=10$ ,  $n_3=15$ , то маємо приблизно однакові значення параметрів газового потоку з точністю до першого знаку після коми. Відомо, що при  $n_3=15$  отримаємо більш точні значення невідомих змінних, тому можна брати  $n_2=10$  точок розбиття і мати значення тиску з точністю до четвертого знаку після коми та температуру з точністю до другого знаку після коми.

#### 4.2 Обчислювальний експеримент для нестационарного режиму течії газу по багатонитковій лінійній ділянці газопроводу

Знову розглядається БЛ ДГ, яка має  $m$  ниток-ділянок трубопроводу ( $m=1,2,3$ ) з однаковими параметрами та різною кількістю точок розбиття кожної ділянки  $n_1=5$ ,  $n_2=10$ ,  $n_3=15$ .

Будемо розглядати ситуацію підключення великого споживача до БЛ ДГ у вузлі два, яка відбувається починаючи з 130 хвилини від початку розрахунку. Це призводить до різкої зміни витрати газу у вузлі 2 і початку перехідного процесу.

Перехідний процес починається з  $k = 26$  часового шару, що відповідає 130 хвилинам, або 2 годинам 10 хвилинам.

Граничні умови для першого вузла:

$$\begin{cases} P_{\text{вуз}}^{(1)}(t) = 83.6 \text{ атм,} \\ T_{\text{вуз}}^{(1)}(t) = 39.1 \text{ }^\circ\text{C,} \end{cases} \quad (4.1)$$

та для другого вузла:

$$G_{\text{вуз}}^{(2)}(t) = \begin{cases} 102.4 \text{ млн. м}^3/\text{добу, } t < 130 \text{ хв.} \\ 122.4 \text{ млн. м}^3/\text{добу, } t \geq 130 \text{ хв.,} \end{cases} \quad (4.2)$$

де  $G_{\text{вуз}}^{(2)}(t)$  – масова витрата у другому вузлі;

$P_{\text{вуз}}^{(1)}(t)$ ,  $T_{\text{вуз}}^{(1)}(t)$  – тиск і температура у першому вузлі.

Необхідно провести розрахунок нестационарного неізотермічного режиму транспорту газу по багатонитковій лінійній ділянці газопроводу, побудувати графіки розподілу параметрів газового потоку (тиску, витрати і температури).

Для цього будемо розглядати масову витрату, тиск та температуру на 1-у, 2-у, 25-у часових шарах, на початку перехідного процесу на 26-у, 27-у, 28-у часових шарах, після перехідного процесу на 40-у, 144-у часових шарах.

Результати розрахунку параметрів газового потоку при  $n_2 = 10$  і  $m = 3$  та  $n_2 = 10$  і  $m = 2$  наведені в табл. 4.5 – 4.12. та табл. 4.13 – 4.20 відповідно.

Таблиця 4.5 – Параметри нестационарного режиму течії газу по  $i$ -й нитці трубопроводу при  $n_1 = 10$  і  $m = 3$  на 1-у часовому шарі

Точка розбиття	Витрата газу на початку ДТ $q_0^i$ (млн м <sup>3</sup> /добу)	Тиск $P^i$ (атм)	Температура $T^i$ (°C)
0	34,3477304	83,6	39,1
1	34,3473737	83,451731	38,3589808
2	34,3387811	83,3036517	37,6330159
3	34,3297015	83,1557153	36,9248883
...	...	...	...
8	34,2106057	82,4195522	33,6473696
9	34,176603	82,2733736	33,0413477
10	34,1333333	82,127344	32,454009

Таблиця 4.6 – Параметри нестационарного режиму течії газу по  $i$ -й нитці трубопроводу при  $n_1 = 10$  і  $m = 3$  на 2-у часовому шарі

Точка розбиття	Витрата газу на початку ДТ $q_0^i$ (млн м <sup>3</sup> /добу)	Тиск $P^i$ (атм)	Температура $T^i$ (°C)
0	34,2061924	83,6	39,1
1	34,206118	83,4532467	38,3623496
2	34,2027807	83,3066748	37,6386783
3	34,1992974	83,1601387	36,9318167
...	...	...	...
8	34,1564763	82,42932	33,6573138
9	34,1452892	82,2834799	33,0504519
10	34,1333333	82,1377661	32,4650503

Таблиця 4.7 – Параметри нестационарного режиму течії газу по  $i$ -й нитці трубопроводу при  $n_1 = 10$  і  $m = 3$  на 25-у часовому шарі

Точка розбиття	Витрата газу на початку ДТ $q_0^i$ (млн м <sup>3</sup> /добу)	Тиск $P^i$ (атм)	Температура $T^i$ (°C)
0	34,1333332	83,6	39,1
1	34,1333338	83,4537534	38,3607376
2	34,1333332	83,3076877	37,6486018
3	34,1333372	83,1615981	36,9437022
...	...	...	...
8	34,1333332	82,432341	33,711253
9	34,1333333	82,2865297	33,1039091
10	34,1333333	82,1408848	32,5242073

Таблиця 4.8 – Параметри нестационарного режиму течії газу по  $i$ -й нитці трубопроводу при  $n_1 = 10$  і  $m = 3$  на 26-у часовому шарі

Точка розбиття	Витрата газу на початку ДТ $q_0^i$ (млн м <sup>3</sup> /добу)	Тиск $P^i$ (атм)	Температура $T^i$ (°C)
0	38,2328887	83,6	39,1
1	38,2308647	83,4130801	38,372073
2	38,3244372	83,2261722	37,6425817
3	38,4147727	83,0372712	36,9114898
...	...	...	...
8	39,8109597	82,0636486	33,5302436
9	40,2318744	81,8548563	32,8858849
10	40,8	81,6459605	32,2685812

Таблиця 4.9 – Параметри нестационарного режиму течії газу по  $i$ -й нитці трубопроводу при  $n_1 = 10$  і  $m = 3$  на 27-у часовому шарі

Точка розбиття	Витрата газу на початку ДТ $q_0^i$ (млн м <sup>3</sup> /добу)	Тиск $P^i$ (атм)	Температура $T^i$ (°C)
0	40,0509681	83,6	39,1
1	40,0502365	83,3971188	38,4055848
2	40,0868904	83,1941413	37,6840262
3	40,1224922	82,9905438	36,9486163
...	...	...	...
8	40,5710272	81,9635968	33,5338377
9	40,6854377	81,7549181	32,8902807
10	40,8	81,5461575	32,2738079

Таблиця 4.10 – Параметри нестационарного режиму течії газу по  $i$ -й нитці трубопроводу при  $n_1 = 10$  і  $m = 3$  на 28-у часовому шарі

Точка розбиття	Витрата газу на початку ДТ $q_0^i$ (млн м <sup>3</sup> /добу)	Тиск $P^i$ (атм)	Температура $T^i$ (°C)
0	40,5947184	83,6	39,1
1	40,5944227	83,392679	38,4375892
2	40,6047096	83,1852066	37,7374708
3	40,6145742	82,9776123	37,0097497
...	...	...	...
8	40,7367992	81,9365717	33,5872852
9	40,7676559	81,7273285	32,9429536
10	40,8	81,5179755	32,3261068

Таблиця 4.11 – Параметри нестационарного режиму течії газу по  $i$ -й нитці трубопроводу при  $n_1 = 10$  і  $m = 3$  на 40-у часовому шарі

Точка розбиття	Витрата газу на початку ДТ $q_0^i$ (млн м <sup>3</sup> /добу)	Тиск $P^i$ (атм)	Температура $T^i$ (°C)
0	40,7996705	83,6	39,1
1	40,7996397	83,3910391	38,4759665
2	40,7996725	83,1818687	37,8779837
3	40,7996447	82,9726598	37,2856915
...	...	...	...
8	40,7997686	81,924301	34,3487615
9	40,7998366	81,7142652	33,7281424
10	40,8	81,5040848	33,1179984

Таблиця 4.12 – Параметри нестационарного режиму течії газу по  $i$ -й нитці трубопроводу при  $n_1 = 10$  і  $m = 3$  на 144-у часовому шарі

Точка розбиття	Витрата газу на початку ДТ $q_0^i$ (млн м <sup>3</sup> /добу)	Тиск $P^i$ (атм)	Температура $T^i$ (°C)
0	40,8	83,6	39,1
1	40,8	83,3910358	38,478574
2	40,8	83,1818579	37,879128
3	40,8	82,9726483	37,2834028
...	...	...	...
8	40,8	81,924147	34,5154446
9	40,8	81,713974	33,990426
10	40,8	81,5035669	33,4869881

Таблиця 4.13 – Параметри нестационарного режиму течії газу по  $i$ -й нитці трубопроводу при  $n_1 = 10$  і  $m = 2$  на 1-у часовому шарі

Точка розбиття	Витрата газу на початку ДТ $q_0^i$ (млн м <sup>3</sup> /добу)	Тиск $P^i$ (атм)	Температура $T^i$ (°C)
0	51,6093361	83,6	39,1
1	51,6059609	83,263858	38,607068
2	51,934523	82,9261702	38,1195139
3	51,5761167	82,5887039	37,6402591
...	...	...	...
8	51,3561619	80,892413	35,3653575
9	51,2895039	80,5534608	34,9348667
10	51,2	80,2131898	34,5141677

Таблиця 4.14 – Параметри нестационарного режиму течії газу по  $i$ -й нитці трубопроводу при  $n_1 = 10$  і  $m = 2$  на 2-у часовому шарі

Точка розбиття	Витрата газу на початку ДТ $q_0^i$ (млн м <sup>3</sup> /добу)	Тиск $P^i$ (атм)	Температура $T^i$ (°C)
0	51,3759631	83,6	39,1
1	51,3750381	83,2674244	38,6096584
2	51,3679756	82,9332644	38,1253023
3	51,3591249	82,5992223	37,6487391
...	...	...	...
8	51,2568425	80,916405	35,3823036
9	51,2294049	80,578543	34,9513718
10	51,2	80,2391047	34,5320312

Таблиця 4.15 – Параметри нестационарного режиму течії газу по  $i$ -й нитці трубопроводу при  $n_1 = 10$  і  $m = 2$  на 25-у часовому шарі

Точка розбиття	Витрата газу на початку ДТ $q_0^i$ (млн м <sup>3</sup> /добу)	Тиск $P^i$ (атм)	Температура $T^i$ (°C)
0	51,2000048	83,6	39,1
1	51,2000052	83,2695045	38,6041868
2	51,2000048	82,9374381	38,1229196
3	51,2000051	82,6053155	37,6436978
...	...	...	...
8	51,2000019	80,9295159	35,3848728
9	51,2000012	80,592056	34,9515708
10	51,2	80,2529525	34,5328034

Таблиця 4.16 – Параметри нестационарного режиму течії газу по  $i$ -й нитці трубопроводу при  $n_1 = 10$  і  $m = 2$  на 26-у часовому шарі

Точка розбиття	Витрата газу на початку ДТ $q_0^i$ (млн м <sup>3</sup> /добу)	Тиск $P^i$ (атм)	Температура $T^i$ (°C)
0	56,3097222	83,6	39,1
1	56,3022797	83,195955	38,6001014
2	56,4744531	82,7893539	38,085374
3	56,6344965	82,3773091	37,558877
...	...	...	...
8	59,2575779	80,2130049	35,002838
9	60,0668958	79,7362415	34,4865146
10	61,2	79,256129	33,9786272

Таблиця 4.17 – Параметри нестационарного режиму течії газу по  $i$ -й нитці трубопроводу при  $n_1 = 10$  і  $m = 2$  на 27-у часовому шарі

Точка розбиття	Витрата газу на початку ДТ $q_0^i$ (млн м <sup>3</sup> /добу)	Тиск $P^i$ (атм)	Температура $T^i$ (°C)
0	59,200584	83,6	39,1
1	59,1961439	83,1556912	38,6257766
2	59,2907564	82,7080294	38,1139458
3	59,3785732	82,2575616	37,5759986
...	...	...	...
8	60,5605308	79,9380527	37,0439462
9	60,8718591	79,454557	34,9367284
10	61,2	78,9675161	33,9127684

Таблиця 4.18 – Параметри нестационарного режиму течії газу по  $i$ -й нитці трубопроводу при  $n_1 = 10$  і  $m = 2$  на 28-у часовому шарі

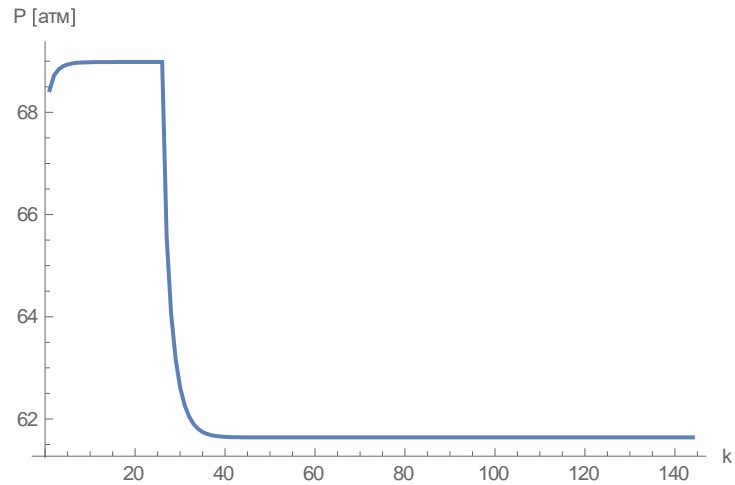
Точка розбиття	Витрата газу на початку ДТ $q_0^i$ (млн м <sup>3</sup> /добу)	Тиск $P^i$ (атм)	Температура $T^i$ (°C)
0	60,4007511	83,6	39,1
1	60,3984706	83,1389981	38,6540608
2	60,4381329	82,6742331	38,1670584
3	60,4742704	82,2083165	37,6416309
...	...	...	...
8	60,9482659	79,8302331	34,9892824
9	61,0701586	79,34365	34,4731458
10	61,2	78,8532957	33,9660727

Таблиця 4.19 – Параметри нестационарного режиму течії газу по  $i$ -й нитці трубопроводу при  $n_1 = 10$  і  $m = 2$  на 40-у часовому шарі

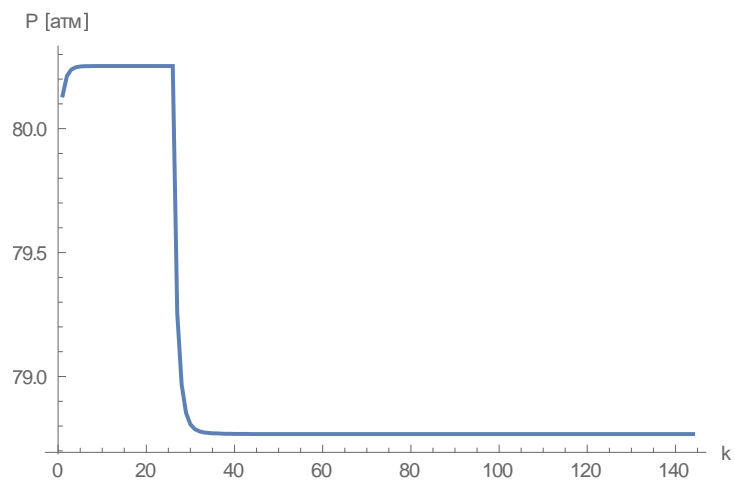
Точка розбиття	Витрата газу на початку ДТ $q_0^i$ (млн м <sup>3</sup> /добу)	Тиск $P^i$ (атм)	Температура $T^i$ (°C)
0	61,1996643	83,6	39,1
1	61,1995768	83,1277457	38,6854397
2	61,1996713	82,6513853	38,2795515
3	61,1995929	82,1748986	37,8764609
...	...	...	...
8	61,199785	79,752908	35,9292425
9	61,1998034	79,2626493	35,5325618
10	61,2	78,7680519	35,1129686

Таблиця 4.20 – Параметри нестационарного режиму течії газу по  $i$ -й нитці трубопроводу при  $n_1 = 10$  і  $m = 2$  на 144-у часовому шарі

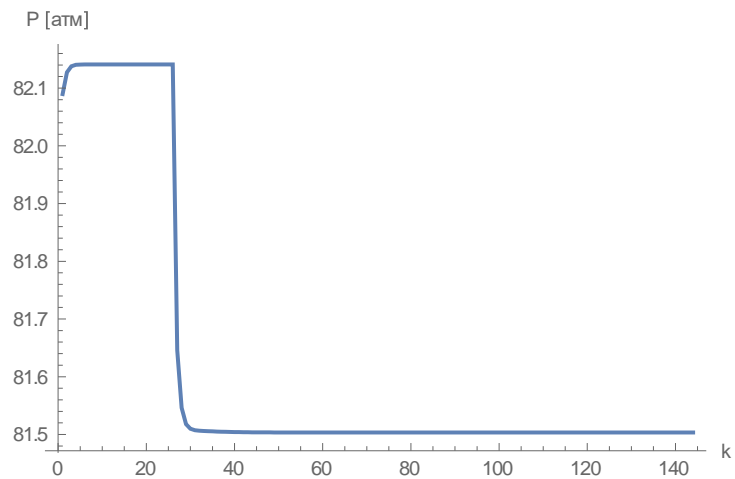
Точка розбиття	Витрата газу на початку ДТ $q_0^i$ (млн м <sup>3</sup> /добу)	Тиск $P^i$ (атм)	Температура $T^i$ (°C)
0	61,2	83,6	39,1
1	61,2	83,1277406	38,6849029
2	61,2	82,6513741	38,2801921
3	61,2	82,1748815	37,8766614
...	...	...	...
8	61,2	79,7528551	35,9567783
9	61,2	79,2625126	35,5860056
10	61,2	78,7678209	35,2255351



а)



б)

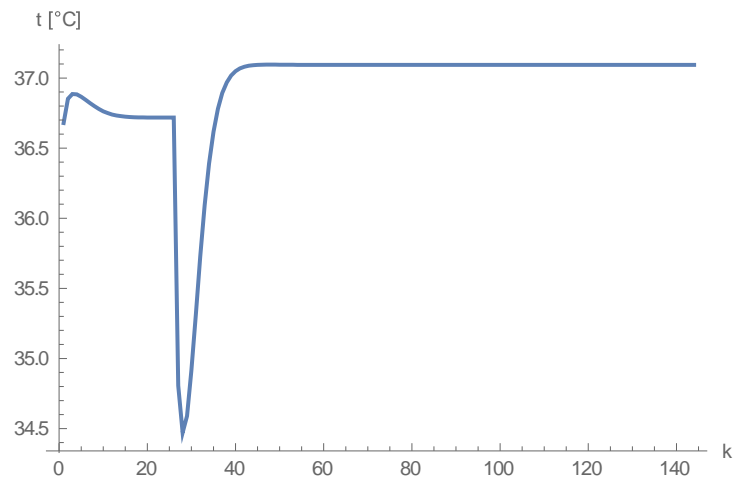


в)

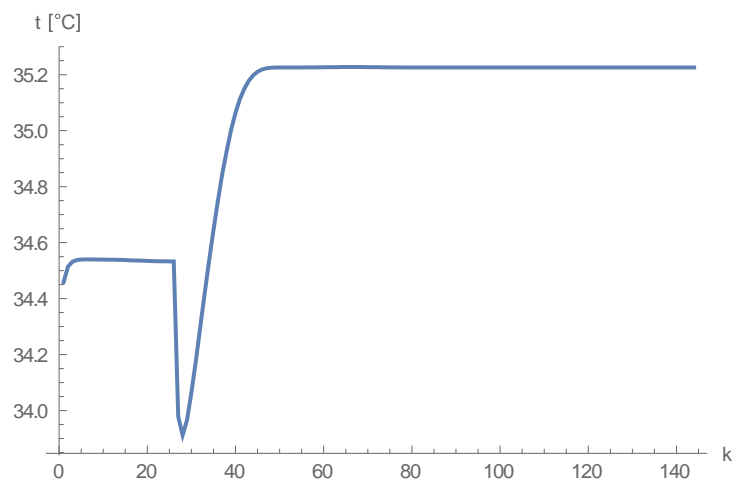
а)  $m = 1$ ; б)  $m = 2$ ; в)  $m = 3$ 

Рисунок 4.1 – Графіки параметру тиску газового потоку

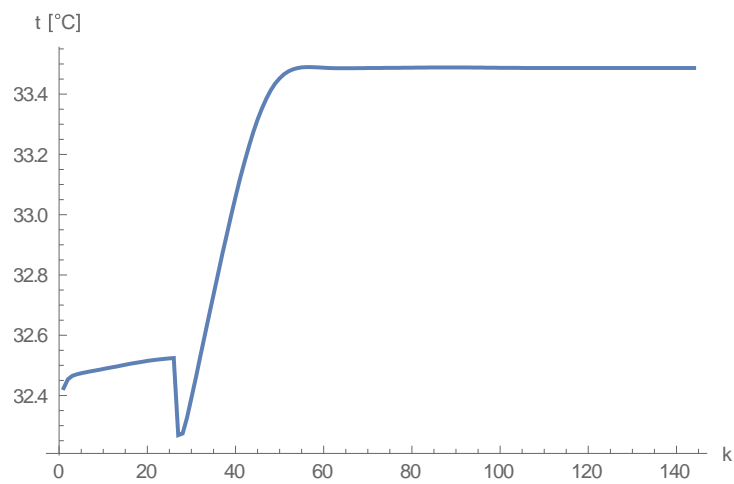
 $P_{\text{вуз}}^{(2)}(t)$  (атм) другому вузлі при:



а)



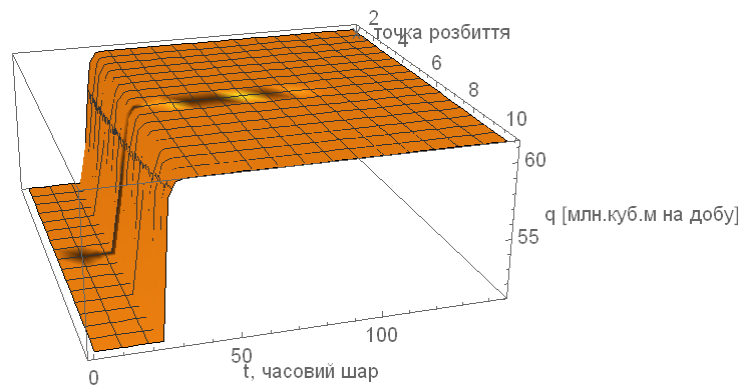
б)



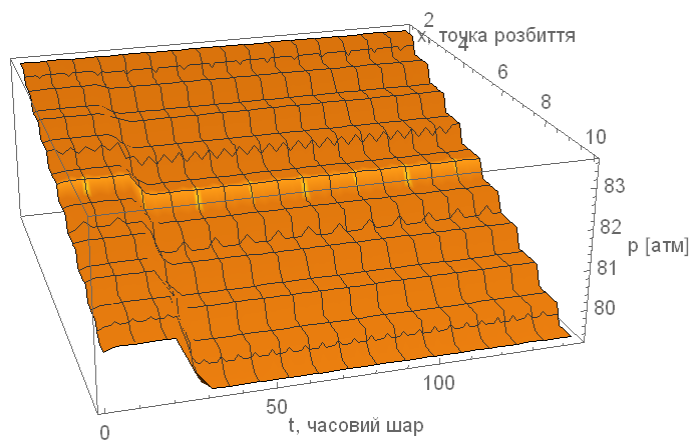
в)

а)  $m=1$ ; б)  $m=2$ ; в)  $m=3$ 

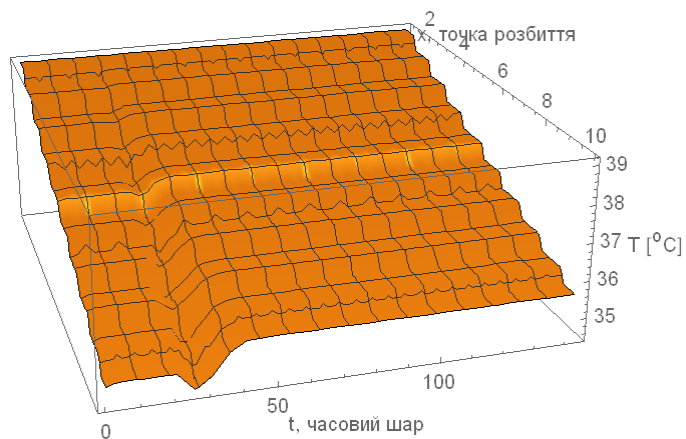
Рисунок 4.2 – Графіки параметру температури газового потоку  $T_{\text{вуз}}^{(2)}(t)$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) другому вузлі при:



а)



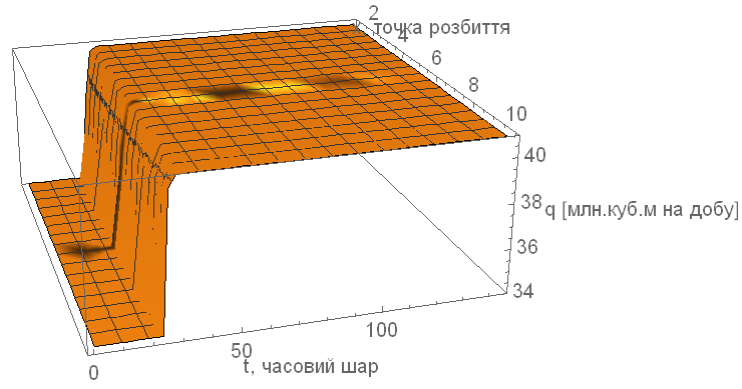
б)



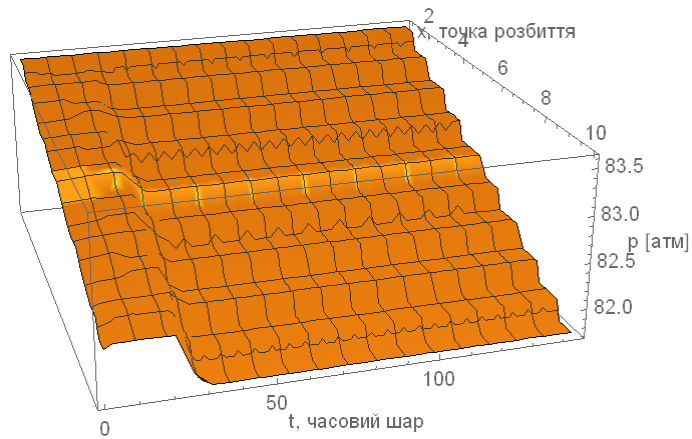
в)

а) витрати газу; б) тиску; в) температури

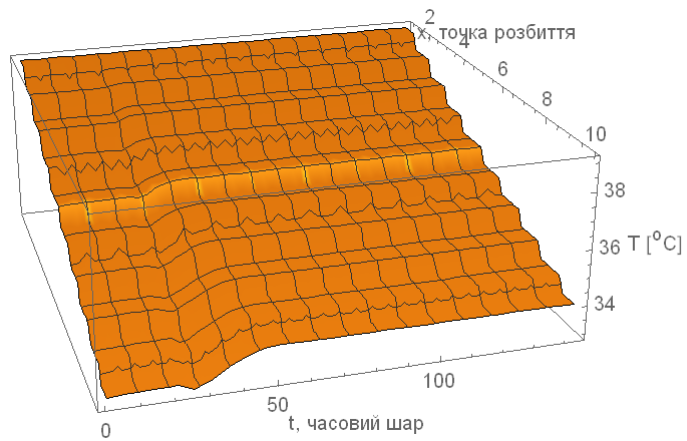
Рисунок 4.3 – Графіки зміни параметрів газового потоку по  $i$ -й нитці трубопроводу при  $m = 2$ :



а)



б)



в)

а) витрати газу; б) тиску; в) температури

Рисунок 4.4 – Графіки зміни параметрів газового потоку по  $i$ -й нитці трубопроводу при  $m=3$ :

На рисунку 4.1 відображене графічне представлення змінної тиску газу  $P_{\text{вуз}}^{(2)}(t)$  у другому вузлі при різній кількості ниток трубопроводу  $m$  в залежності часової змінної  $t$ . На рисунку 4.2 відображене графічне представлення змінної температури газу  $T_{\text{вуз}}^{(2)}(t)$  у другому вузлі при різній кількості ниток трубопроводу  $m$  в залежності часової змінної  $t$ .

Тривимірне зображення отриманих значень невідомих параметрів газового потоку по  $i$ -й нитці трубопроводу при  $m=2$  та  $m=3$  показано на рис. 4.3 – 4.4 відповідно.

Порівняння отриманих результатів, а саме значень параметрів на останньому часовому шарі при  $n_i$ ,  $i=1,2,3$  у другому вузлі БЛ ДГ та витрати на початку  $i$ -й нитці трубопроводу та при різній кількості ДТ у БЛ ДГ наведено у табл. 4.21.

Таблиця 4.21 – Порівняння отриманих значень тиску і температури у другому вузлі, витрати на початку  $i$ -й нитці трубопроводу на 144-у часовому шарі при різних  $n_i$  та при різній кількості ниток  $m$

Кількість ниток	Кількість точок $n_i$	Комер. витрата $q_0^i$ (млн м <sup>3</sup> /добу)	Тиск $P_{\text{вуз}}^{(1)}(t)$ (атм)	Температура $T_{\text{вуз}}^{(2)}$ (°C)
$m=1$	5	122,4	61,757401	37,0960098
	10	122,4	61,6394341	37,0934234
	15	122,4	61,6359142	37,0936558
$m=2$	5	61,2	78,7720695	35,23460283
	10	61,2	78,7678209	35,2255351
	15	61,2	78,7681335	35,226162
$m=3$	5	40,8	81,5037999	33,5050826
	10	40,8	81,5035669	33,4869882
	15	40,8	81,5035525	33,4878064

Час на розрахунок та виведення параметрів газового потоку при різних значеннях точок розбиття  $n_i$  та різної кількості ниток трубопроводу  $m$  наведено у табл. 4.22.

Таблиця 4.22 – Час на розрахунок та виведення параметрів газу

Кількість ниток	Кількість точок $n_i$	Час (хв)
$m = 1$	5	0,164
	10	0,2862
	15	0,4919
$m = 2$	5	0,168485
	10	0,313011
	15	0,488787
$m = 3$	5	0,166141
	10	0,329156
	15	0,543472

Аналіз отриманих результатів показує, що нестационарному режимі течії газу для фіксованої кількості ниток трубопроводу, якщо брати кількість точок розбиття  $n_1 = 5$ ,  $n_2 = 10$ ,  $n_3 = 15$ , то отримано приблизно однакові значення параметрів газового потоку з точністю до першого знаку після коми. Відомо, що при  $n_3 = 15$  отримаємо більш точні значення невідомих змінних, тому можна брати  $n_2 = 10$  точок розбиття і отримувати значення тиску та температури з точністю до третього знаку після коми.

#### Висновки за розділом 4

У четвертому розділі даної кваліфікаційної роботи були проведені обчислювальні експерименти комп'ютерного моделювання стаціонарного і нестационарного режиму течії газу по БЛ ДГ.

Аналізуючи отримані результати можна зробити висновок, що при кількості точок розбиття  $n_2 = 10$  та  $n_3 = 15$  при заданій фіксованій кількості ниток трубопроводу у БЛ ДГ отримали однакові значення параметрів з точністю  $\varepsilon = 10^{-3}$ , отже для розрахунків можна брати  $n_2 = 10$  точок розбиття, якщо влаштовує така точність. Але час на розрахунок на ЕОМ показує, що можна збільшувати точність не витрачаючи на це багато часу.

Отримані результати дозволяють при управлінні газотранспортною мережею проводити аналіз про те, яку кількість ниток необхідно задіяти у БЛ ДГ для отримання необхідних параметрів газового потоку у вузлах БЛ ДГ, щоб забезпечити необхідний якісний режим газопостачання.

## ВИСНОВКИ

Під час написання кваліфікаційної роботи виконано наступні задачі:

- знайдено інформаційні джерела за обраною темою досліджень;
- проаналізовано літературні джерела в межах предметної області;
- проаналізовано предметну область та поставлені задачі дослідження;
- розглянуті існуючі чисельні методи для розв'язання системи рівнянь ММ;
- побудована математична модель нестационарних неізотермічних режимів течії газу по БЛ ДГ, яка представляє з себе взаємопов'язану систему диференціальних рівнянь у частинних похідних;
- обрано метод розв'язання системи рівнянь ММ;
- метод скінчених різниць з використанням неявної різницевої сітки застосовано для чисельного розв'язання системи рівнянь ММ НН РТГ по БЛ ДГ та вказані перетворення, які дозволяють розв'язувати лінійну систему рівнянь на етапі застосування методу Ньютона.

Результатом цієї кваліфікаційної роботи стало розроблення алгоритму та програмного продукту, який виконує розрахунки невідомих параметрів газового потоку на по БЛ ДГ в умовах нестационарного режиму.

Отримані результати дозволяють при управлінні газотранспортною мережею проводити аналіз про те, яку кількість ниток необхідно задіяти у БЛ ДГ для отримання необхідних параметрів газового потоку у вузлах БЛ ДГ, щоб забезпечити необхідний якісний режим газопостачання.

Результати даної роботи можуть бути використані для моделювання та оптимізації режимів роботи газопроводів під час аварійних та нештатних ситуацій для підвищення їх експлуатаційної безпеки, а також для розробки нових технологій та стратегій в енергетичній галузі.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Poliatykin A., Husarova I. Modelling of Non-Stationary Regimes Along Multi-Line Linear Sections of the Pipeline. *II International Scientific & Practical Conference LEARNING & TEACHING: after War and during Peace (Kharkiv, Ukraine, 10 of November, 2023)*, Kharkiv : KNPU, 2023. P.224.

2. Полятикін А. О., Гусарова І. Г. Моделювання нестационарних режимів течії газу по багатонитковій лінійній ділянці газопроводу. *27-й Міжнародний молодіжний форум «Радіоелектроніка та молодь у XXI столітті»*: зб. матеріалів форуму (м. Харків, 10-12 травня 2023 р.). Т. 7. Харків : ХНУРЕ, 2023. С. 179-180.

3. Гусарова І. Г., Полятикін А. О. Чисельний метод для моделювання нестационарних режимів по багатонитковій лінійній ділянці газопроводу. *The current state of development of world science: characteristics and features: collection of scientific papers «SCIENTIA» with Proceedings of the VI International Scientific and Theoretical Conference, December 15, 2023. Lisbon, Portuguese Republic : International Center of Scientific Research. 2023. P 126-130.*

4. Perumal D. Numerical simulation of gaseous microflows by lattice Boltzmann method. *International Journal of Recent Trends in Engineering*. 2009. No. 1. P. 15-20.

5. Husarova I. H., Tevyashev A. D., Tevyasheva O. A. Mathematical modeling of non-stationary gas flow modes along a linear section of a gas transmission system. *Mathematical Modeling and Computing*. 2022. Vol. 9, No. 2. P. 416-430.

6. Мельник М. О., Гусарова І. Г. Моделювання нестационарних режимів по ділянці трубопроводу змінного перерізу. *26-й Міжнародний молодіжний форум «Радіоелектроніка і молодь у XXI столітті»*: зб. матеріалів форуму (м. Харків, 20 грудня 2023 р.). Т. 7, 8. Харків : ХНУРЕ, 2022. С. 23-24.

7. Селезнев В. Е., Алешин В. В., Клишин Г. С. Методы и технологии численного моделирования газопроводных систем. Москва : Едиториал УРСС, 2002. 488 с.

8. Гусарова І. Г., Соловьев А. М. Застосування методу Бройдена при комп'ютерному моделюванні перехідних режимів течії газу. *Системи обробки інформації*. 2019. № 2(157). С. 33-39.