

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет інформаційно-аналітичних технологій та менеджменту

Кафедра прикладної математики

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 124 Системний аналіз
(код і повна назва)

Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Системний аналіз і управління
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри ПМ _____
(підпис)
“ _____ ” _____ 2021 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Смоковському Руслану Сергійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Комп'ютерне моделювання нестационарних режимів по ділянці трубопроводу великого діаметру з урахуванням кінетичної енергії

затверджена наказом по університету від 05 листопада 2021 р. № 1642 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 10 грудня 2021 р.

3. Вихідні дані до роботи математична модель нестационарного неізотермічного режиму течії газу по ділянці трубопроводу великого діаметру з урахуванням кінетичної енергії

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі _____
- 1. Аналіз предметної області та постановка задач дослідження
 - 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	8 – 14 листопада 2021 р.	виконано
2	Вибір та обґрунтування методу	15 – 21 листопада 2021 р.	виконано
3	Розробка алгоритму і програми	22 – 28 листопада 2021 р.	виконано
4	Проведення аналітичних досліджень та розрахунків	29 листопада – 5 грудня 2021 р.	виконано
5	Робота над текстом пояснювальної записки	6 – 9 грудня 2021 р.	виконано
6	Представлення роботи на рецензію в ЕК	10 грудня 2021 р.	виконано

Дата видачі завдання 8 листопада 2021 р.

Студент _____
(підпис)

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

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 113 с., 39 табл., 87 рис., 2 дод., 13 джерел.

ВЕЛИКИЙ ДІАМЕТР, ВЕЛИКИЙ СПОЖИВАЧ, ДІЛЯНКА ТРУБОПРОВОДУ, ЕФЕКТ ДЖОУЛЯ-ТОМСОНА, КІНЕТИЧНА ЕНЕРГІЯ, МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ, МЕТОД СКІНЧЕННИХ РІЗНИЦЬ, НЕСТАЦІОНАРНИЙ НЕІЗОТЕРМІЧНИЙ РЕЖИМ ТЕЧІЇ ГАЗУ.

Об'єкт дослідження – нестационарний неізотермічний режим течії газу (НН РТГ) по ділянці трубопроводу (ДТ) великого діаметру з урахуванням кінетичної енергії.

Мета роботи – дослідження доцільності використання математичної моделі (ММ) НН РТГ по ДТ великого діаметру з урахуванням кінетичної енергії, порівняльний аналіз результатів комп'ютерного моделювання.

Методи дослідження – метод скінченних різниць з використанням рівномірної скінченно-різницевої сітки (РСРС) та метод Ньютона для чисельного розв'язання систем нелінійних рівнянь.

У даній кваліфікаційній роботі проведено огляд існуючих ММ режимів роботи (РР) газотранспортних систем (ГТС). Розглянуто дві моделі: ММ НН РТГ по ДТ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона, ММ НН РТГ по ДТ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона та кінетичної енергії. Розглянуто метод скінчених різниць з використанням РСРС та алгоритм розв'язання системи рівнянь ММ НН РТГ по ДТ. Створено програмний продукт (ПП), за допомогою якого отримано та порівняно результати обчислень для двох ММ.

За результатами даного дослідження побудований ПП моделювання НН РТГ по ДТ; отримані та проаналізовані результати, які можна вважати корисними для розробки нових способів збільшення надійності ГТС, прогнозування режимів течії газу (РТГ), особливо в нештатних та аварійних ситуаціях, та моделювання більш складних систем.

ABSTRACT

Introductory note: 113 pages, 39 tables, 87 figures, 2 appendixes, 13 sources.

LARGE DIAMETER, BIG CONSUMER, PIPELINE SECTION, JOULE-THOMSON EFFECT, KINETIC ENERGY, MATHEMATICAL MODEL, FINITE DIFFERENCE METHOD, NON-STATIONARY NON-ISOTHERMAL REGIME OF GAS FLOW.

Object of research – non-stationary non-isothermal regime of gas flow (NN RGF) along a section of large diameter pipeline (PS) taking into account kinetic energy.

Purpose of work – research of expediency of use of mathematical model (MM) of NN RGF on PS of large diameter taking into account kinetic energy, comparative analysis of results of computer modeling.

Methods of research – the finite difference method using a uniform finite-difference grid (UFDG) and Newton's method for numerical solution of systems of nonlinear equations.

In this qualification work, an overview of the existing MM modes of operation (MO) of gas transmission systems (GTS). Two models are considered: MM NN RGF on PS taking into account the Joule-Thomson effect, MM NN RGF on PS taking into account the Joule-Thomson effect and kinetic energy. The method of finite differences using UFDG and the algorithm for solving the system of equations MM NN RGF on PS are considered. A software product (SP) was created, with the help of which the results of calculations for two MM were obtained and compared.

According to the results of this study, the SP modeling NN RGF on PS was constructed; obtained and analyzed results that can be considered useful for the development of new ways to increase the reliability of the GTS, the prediction of gas flow regimes (RGF), especially in abnormal and emergency situations, and modeling of more complex systems.

ЗМІСТ

	С.
Перелік умовних скорочень	7
Вступ	8
1 Аналіз предметної області та постановка задач дослідження	10
1.1 Огляд існуючих математичних моделей режимів роботи газотранспортних систем	10
1.2 Змістовна постановка задачі	14
1.3 Формальна постановка задачі	14
1.4 Постановка задач дослідження	16
2 Математичні моделі нестационарних режимів течії газу по ділянці трубопроводу	18
2.1 Математична модель НН РТГ по ДТ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона	18
2.2 Математична модель НН РТГ по ДТ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона та кінетичної енергії	24
3 Обґрунтування методу та алгоритму розв'язання системи рівнянь математичної моделі НН РТГ по ДТ з використанням РСРС	26
4 Програмна реалізація	36
4.1 Система комп'ютерної алгебри Mathematica 11.1	36
4.2 Опис програми	37
5 Результати обчислювального експерименту та їх аналіз	38
Висновки	77
Перелік джерел посилання	78
Додаток А Лістинг програмного продукту	80
Додаток Б Результати обчислювального експерименту	101

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

РСРС – рівномірна скінченно-різницева сітка;

НН РТГ – нестационарний неізотермічний режим течії газу;

ДТ – ділянка трубопроводу;

ММ – математична модель;

ГТС – газотранспортна система;

ЛД – лінійна ділянка;

КС – компресорна станція;

РТГ – режими течії газу;

ПП – програмний продукт;

РР – режими роботи.

ВСТУП

Актуальність теми. В останні десятиліття в Україні розвивається інфраструктура великих міст, йде модернізація та розвиток промисловості, що у свою чергу значно збільшує обсяги споживання природного газу та потребує максимальної цілісності та надійності ГТС України.

Стабільна робота ГТС є запорукою забезпечення безпеки життя населення та її економічних показників. Однак у зв'язку з низкою факторів трапляються збої, які, у свою чергу, можуть спричинити серйозні наслідки. Через це газотранспортні підприємства України гостро зіштовхнулися із проблемами підвищення надійності безперебійної подачі природного газу споживачам.

Сучасні ММ та методи розрахунку нестационарних неізотермічних РР ГТС складної структури або мають обмежену сферу застосування, або спрощені, тобто не враховують складність об'єкта моделювання та розраховують усі процеси, що відбуваються при транспортуванні газу, з недостатнім ступенем точності і тому потребують удосконалення.

На сьогоднішній день, рішення такого роду проблем здійснюється, в тому числі, і за рахунок комп'ютерного моделювання нестационарних неізотермічних РР ГТС, яке дає можливість описувати і прогнозувати штатні та позаштатні РР ГТС на більш високому рівні, включаючи аварійні ситуації та їх наслідки.

Проблемі моделювання нестационарних неізотермічних РР ГТС присвячено велику кількість робіт вітчизняних та зарубіжних вчених, які досягли значних результатів у цій галузі, однак, незважаючи на це, залишається чимало невирішених проблем.

Актуальність кваліфікаційної роботи обумовлена: постійним вдосконаленням трубопровідного транспорту; збільшенням надійності ГТС; необхідністю уточнення існуючих ММ; необхідністю найбільш адекватно описувати та враховувати всі особливості реальних фізичних процесів, що відбуваються в окремих об'єктах ГТС при штатних та позаштатних РР, включаючи аварійні ситуації; отриманням нових підходів до розрахунку трубопроводів та їх систем.

Мета і завдання кваліфікаційної роботи. Метою кваліфікаційної роботи є дослідження доцільності використання кінетичної енергії при математичному моделюванні НН РТГ, пов'язаних з підключенням та відключенням великих споживачів, для ДТ великого діаметру. Для досягнення поставленої мети необхідно виконати наступні завдання:

- провести огляд і аналіз сучасного стану задачі «математичного моделювання НН РТГ по ДТ великого діаметру»;
- обрати ММ НН РТГ по ДТ великого діаметру;
- вибрати методи розв'язання системи рівнянь ММ НН РТГ по ДТ великого діаметру;
- створити ПП, який буде розраховувати параметри газового потоку при НН РТГ по ДТ для обраних ММ;
- провести обчислювальні експерименти з різними вхідними даними;
- отримати та порівняти результати обчислень на базі двох обраних ММ НН РТГ по ДТ;
- проаналізувати результати дослідження.

Об'єктом дослідження є НН РТГ по ДТ великого діаметру з урахуванням кінетичної енергії.

Предметом дослідження є ММ НН РТГ по ДТ великого діаметру з урахуванням кінетичної енергії та методи розв'язання НН РТГ по ДТ великого діаметру.

Методи дослідження. У кваліфікаційній роботі використовуються метод скінченних різниць з використанням РСРС та метод Ньютона для чисельного розв'язання систем нелінійних рівнянь.

Публікації. Результати, отримані у кваліфікаційній роботі, було представлено на Міжнародній науково-практичній конференції «Інформаційні технології та системи» (м. Харків, 8-9 квітня 2021 р.) [1] та II-й Міжнародній науковій конференції «Здобутки та досягнення прикладних та фундаментальних наук XXI століття» (м. Рівне, 5 листопада 2021 р.) [2].

1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Огляд існуючих математичних моделей режимів роботи газотранспортних систем

Використання ММ завжди пов'язане з пізнанням і спрощенням об'єкта, що моделюється. Модель, як правило, є простіше оригіналу, так як не описує об'єкт у всій повноті його властивостей, а відображає лише деякі його досліджувані характеристики. І найважливіше те, що модель більш зручна і більш доступна для дослідження, ніж модельований об'єкт. Тому основний успіх моделювання полягає у вдалому виборі ММ.

Про незавершеність задачі моделювання складних процесів транспортування газу по сучасним газопроводам говорить і безперервний потік публікацій на цю тему [3 – 6]. Пропоновані в роботах моделі засновані на тих чи інших спрощуючих припущеннях, таких як: одномірність процесів, їх стаціонарність, ізотермічність, нестисливість потоку тощо. На даний момент побудовано безліч ММ одних і тих же об'єктів ГТС, що враховують ті чи інші особливості їх РР. В області моделювання трубопровідних систем варто відзначити роботи С.М. Прялова, С.О. Сарданашвілі, М.Г. Сухарєва, М. В. Лур'є, В.Є. Селезньова, В.В. Альошина, А.Д. Тевяшева, J. Kralik, P. Stiegler та багатьох інших вітчизняних і зарубіжних вчених.

Відомо, що ММ РР об'єктів ГТС розробляються на основі аналітичних залежностей і є напівемпіричними, тобто взаємозв'язок параметрів течії газу (витрати, тиску та температури газу) встановлюється на підставі фізичних законів, але в формули вводяться коефіцієнти, отримані під час обробки результатів натурних та лабораторних експериментів.

ММ залежно від складності проблеми і цілей моделювання можуть бути описані системами алгебраїчних, диференціальних, інтегральних рівнянь, або їх комбінаціями.

При математичному описі моделі слід звернути увагу на адекватність протікаючим процесам, оскільки ММ можуть описувати РР ГТС (її елементів) з тим або іншим ступенем коректності та практичної застосовності. Часто вважається, що додавання нових елементів у модель, а також врахування додаткових факторів завжди підвищує точність моделі, тобто, чим складніша модель, тим вона точніше. Однак при побудові ММ підвищеної точності необхідно дотримуватися балансу між витратами на їх розробку і цінністю інформації, одержуваної в результаті їх використання, так як ще однією характеристикою моделі є співвідношення простоти моделі і одержуваної точності розрахункових даних.

Таким чином, зробити правильний вибір моделей об'єктів ГТС і обґрунтовано застосовувати їх при розрахунку і аналізі РР ГТС (штатних та позаштатних) можна після проведення повного всебічного аналізу розглянутих моделей і обґрунтування прийнятих припущень, які дозволяють спростити модель, але при цьому зберегти всі основні особливості розглянутого процесу.

З усього сказаного хочеться привести наочний приклад найбільш відомої моделі транспортування газів по газопроводу. Це одновимірна нестационарна неізотермічна модель транспортування неідеального стисливого газу по трубах. При постійному поперечному перерізі газопроводу без припливу і відпливу газу через бічну поверхню система рівнянь цієї моделі записується таким чином:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial z} = 0,$$

$$\frac{\partial \rho v}{\partial t} + \frac{\partial(p + \rho v^2)}{\partial z} = -\rho g \frac{d\tilde{y}}{dz} - \lambda \rho \frac{v|v|}{2D},$$

$$\frac{\partial(\rho e)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho v \left(e + \frac{p}{\rho} \right) \right) = \frac{4\alpha}{D} (T^* - T) - \rho v g \frac{d\tilde{y}}{dz},$$

$$e = \varepsilon + \frac{v^2}{2}, \quad i = \varepsilon + \frac{p}{\rho},$$

$$p = Z \rho R_g T, \quad Z = 1 + 0,07 \frac{p}{p_c} \frac{T}{T_c} \left(1 - 6 \frac{T_c^2}{T^2} \right),$$

$$i = \int_{T_0}^T c_{p0} dT + RT \left(Z - z_2^* \right) \left(1 - \frac{p_0}{p} \right),$$

$$z_2^* = 1 + 0,84 \frac{T_c^3}{T^3} \frac{p}{p_c},$$

де t – часова координата;

z – координата вздовж осі газопроводу;

$\rho(z, t)$ – середня по перетину газопроводу щільність;

$p(z, t)$ – середній по перетину газопроводу тиск;

$T(z, t)$ – середня по перетину газопроводу температура;

$v(z, t)$ – середня по перетину газопроводу швидкість газу;

$e(z, t)$ – питома повна енергія;

$\varepsilon(z, t)$ – питома внутрішня енергія;

$i(z, t)$ – питома ентальпія газу;

D – діаметр газопроводу;

\tilde{y} – ордината точки z осі газопроводу;

ϕ – кут між віссю газопроводу та горизонтальною площиною;

λ – коефіцієнт гідравлічного опору;

Re – число Рейнольдса;

μ – коефіцієнт динамічної в'язкості газу;

k – коефіцієнт відносної шорсткості;

α – сумарний коефіцієнт теплопередачі через бічну поверхню газопроводу;

T^* – температура зовнішнього середовища;

Z – коефіцієнт стисливості газу;

R_g – газова стала;

p_c – критичний тиск газу;

T_c – критична температура газу;

c_{p_0} – масова щільність теплоємності при постійному тиску.

Зауваження: $\tilde{y} = z \sin(\phi)$, $\lambda = \lambda(\text{Re}, k)$, $\text{Re} = \frac{\rho v D}{\mu}$, похідна $\frac{d\tilde{y}}{dz}$ на спуску

негативна, на підйомі позитивна.

Звернемо увагу, що в рівнянні балансу повної енергії тут нехтується дисипацією енергії, обумовленої наявністю сил тертя в турбулентному потоці в'язкого недосконалого газу. Дослідження та алгоритм чисельного розв'язання системи рівнянь наведеної моделі дані в книзі О.Ф. Васильєва, Е.О. Бондарєва, А.Ф. Воеводіна та М.О. Каніболотського [7].

Крім вітчизняних досліджень можна навести багато прикладів з наукових робіт зарубіжних вчених, однією з таких є робота Dominique Adolfo та Carcasci Carlo. У цій статті основна увага приділяється реалізації моделі трубопроводу, що є найважливішим компонентом з динамічними характеристиками, а також авторами розроблена програма Gas Network Solver, яка призначена для моделювання поведінки РР газотранспортних трубопроводів великого діаметра та довжини [8].

Одне з вирішальних впливів на нестационарний неізотермічний РР ГТС надають РТГ по ДТ, ММ яких можна збудувати на базі повної системи рівнянь газової динаміки, які виводяться із законів збереження маси, зміни кількості руху і енергії.

З аналізу існуючих ММ РР об'єктів ГТС, не всі моделі мають такі важливі характеристики, як співвідношення простоти, універсальності і необхідного набору змінних, що враховують фізичні процеси в газовому середовищі і структуру самих об'єктів ГТС. Деякі ММ враховують багатокомпонентність газу, що не завжди виправдано. Деякі містять занадто багато змінних, а наявної інформації про ГТС не завжди вистачає, щоб описати всі параметри. Або навпаки, настільки спрощені, що не дозволяють враховувати важливі фактори, що впливають на РР ГТС. Тому, для найбільш адекватного моделювання РР ГТС з необхідним ступенем деталізації об'єктів, були обрані моделі, які, на увазі наявних недоліків, потім були або спрощені без втрати точності одержуваних ре-

зультатів, або вдосконалені для обліку необхідних чинників [1, 9].

1.2 Змістовна постановка задачі

РР ГТС, а також характеристики окремих її елементів мають ряд специфічних властивостей, які необхідно враховувати при комп'ютерному моделюванні. А саме, для повноцінного моделювання РР ГТС по ДТ великого діаметру необхідно врахувати нестационарність та неізотермічність РТГ, а також важливі фізичні властивості газу та процеси, що відбуваються в газовому середовищі під час течії газу ДТ, які суттєво впливають на РР ГТС.

В кваліфікаційній роботі будемо розглядати ДТ, яка має вигляд циліндричної труби заданої довжини постійного діаметру з жорсткими стінками, де задано початковий розподіл газу. На границях цієї ділянки відбувається різка зміна граничних умов, тому РТГ стають нестационарними та неізотермічними. Будемо вважати, що на ДТ задано початковий розподіл газу, а на границях ділянки задані тиск або витрата газу як функції часу та температура газу, що надходить на ділянку.

Метою кваліфікаційної роботи є дослідження доцільності використання кінетичної енергії при математичному моделюванні НН РТГ, пов'язаних з підключенням та відключенням великих споживачів, для ДТ великого діаметру.

1.3 Формальна постановка задачі

З точки зору опису РТГ, ГТС складається з двох основних елементів: ЛД та компресорних станцій (КС).

В даній роботі досліджується ДТ довжини L , яку схематично можна навести за допомогою рисунку 1.1.

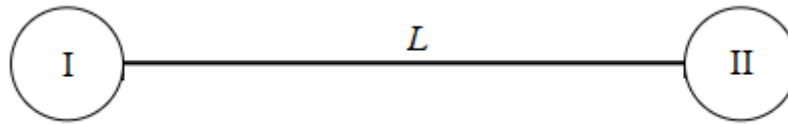


Рисунок 1.1 –Лінійна ділянка трубопроводу

На рисунку 1.1 кружечки I, II – це вхід та вихід ЛД.

У подальшому будемо вважати, що РТГ по ДТ є нестационарними та неізотермічними, через те, що один з параметрів газового потоку на границі ділянки різко змінює своє значення.

Описувати такі режими можна за допомогою функцій питомої масової витрати $W(x,t)$, тиску $P(x,t)$ та температури $T(x,t)$, заданих в області $\Lambda = \{(x,t) : 0 \leq x \leq L, 0 \leq t \leq T_{\max}\}$, де T_{\max} – час закінчення процесу.

У вузлах I, II задані граничні умови 1-го або 2-го типу, тобто задані тиск або витрата газу, як функція часу, крім того задана температура газу, що надходить. Задано початковий розподіл параметрів газового потоку, тобто:

$$\begin{cases} W(x,0) = W_0(x), \\ P(x,0) = P_0(x), \\ T(x,0) = T_0(x), \\ x \in (0,L), \end{cases} \quad (1.1)$$

де $W_0(x), T_0(x), P_0(x)$ – відомі функції.

Граничні умови матимуть вигляд:

$$\begin{cases} \left[\begin{array}{l} P(0,t) = P^I(t), \\ G(0,t) = G^I(t), \\ T(0,t) = T^I(t), \end{array} \right. & \left[\begin{array}{l} P(L,t) = P^{II}(t), \\ G(L,t) = G^{II}(t), \end{array} \right. \end{cases} \quad (1.2)$$

де $G(x,t)$ – масова витрата;

$G^I(t), P^I(t), T^I(t), G^{II}(t), P^{II}(t)$ – задані функції.

Для розрахунку НН РТГ по ДТ необхідно задати початковий розподіл параметрів газового потоку: витрат, тисків та температур, тому в якості такого розподілу доцільно взяти розподіл, отриманий за умови стаціонарності РТГ.

Режими транспорту газу є найбільш складними для моделювання та управління, особливо в екстремальних ситуаціях, тому доцільно використовувати критерій нестационарності РТГ. За допомогою цього критерію можна визначити стаціонарність або нестационарність РТГ.

Нестационарність режимів транспорту газу по ЛД визначається як

$$MH = \max \begin{cases} \max_{i,j} |P_{ПД_i} - P_{ПД_j}|, \\ \max_{i,j} |P_{КД_i} - P_{КД_j}|, \end{cases}$$

де $P_{ПД_i}$ ($i=0,1,\dots$) – заміри тиску на початку ЛД в момент часу t_i , протягом аналізованого періоду $[0, T]$;

$P_{КД_j}$ ($j=0,1,\dots$) – заміри тиску в кінці ЛД в момент часу t_j , протягом аналізованого періоду $[0, T]$.

Якщо $MH \leq \varepsilon$, то режим вважається квазістаціонарним, в іншому випадку нестационарним в інтервалі часу $[0, T]$, ε беремо рівним одній атмосфері.

1.4 Постановка задач дослідження

Зі сказаного вище видно, що ГТС є складним газодинамічним комплексом, як із погляду складу і структури, так і з погляду РР.

Аналіз стану ГТС та її РР, а також огляд літератури з проблеми математичного моделювання НН РТГ дозволив сформулювати мету та завдання дослідження.

джень, наведених у даній кваліфікаційній роботі, вирішення яких є актуальним як у науковому, так і практичному плані.

Метою кваліфікаційної роботи є дослідження доцільності використання ММ НН РТГ по ДТ великого діаметру з урахуванням кінетичної енергії.

Для досягнення поставленої мети у роботі необхідно вирішити такі завдання:

- обрати ММ НН РТГ по ДТ великого діаметру;
- вибрати методи розв'язання системи рівнянь ММ НН РТГ по ДТ великого діаметру;
- створити ПП, який буде розраховувати параметри газового потоку при НН РТГ по ДТ для обраних ММ;
- провести обчислювальні експерименти з різними вхідними даними;
- отримати та порівняти результати обчислень на базі двох обраних ММ НН РТГ по ДТ;
- проаналізувати результати дослідження.

2 МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ НЕСТАЦІОНАРНИХ РЕЖИМІВ ТЕЧІЇ ГАЗУ ПО ДІЛЯНЦІ ТРУБОПРОВОДУ

2.1 Математична модель НН РТГ по ДТ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона

Оскільки ДТ великого діаметру, то при моделюванні нестационарного РТГ будемо враховувати ефект Джоуля-Томсона. Насамперед розглянемо коефіцієнт Джоуля-Томсона, який має вигляд

$$D_i = \lim_{\Delta P \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta T}{\Delta P} \right)_i = \left(\frac{\partial T}{\partial P} \right)_i,$$

це означає, що коефіцієнтом Джоуля-Томсона називається границя відношення зміни температури газу до зміни його тиску.

Таким чином, щоб врахувати ефект Джоуля-Томсона в НН РТГ по ДТ, який представляє собою циліндричну трубу постійного діаметра, необхідно переписати початкову систему квазілінійних диференціальних рівнянь в частинних похідних гіперболічного типу (отриманих із загальних рівнянь газової динаміки для одновимірного випадку з урахуванням відсутності масообміну з навколишнім середовищем, стаціонарності режимів теплообміну з навколишнім середовищем та нехтуванням теплофізичними властивостями середовища) [10]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho V) + \frac{\partial}{\partial x} \left(P + (1 + \beta) \rho V^2 \right) = -\rho \left(\frac{\lambda |V| V}{2D} + g \frac{dh}{dx} \right), \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho V) = 0, \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho V \left(E + \frac{P}{\rho} \right) \right) = \frac{4K}{D} (T_{sp} - T) - \rho V g \frac{dh}{dx}, \quad (2.3)$$

де $\rho(x,t)$ – щільність ($\text{кг} / \text{м}^3$);

$V(x,t)$ – швидкість ($\text{м} / \text{с}$);

$T(x,t)$ – температура (К);

$P(x,t)$ – тиск газу (Па);

t – часова змінна (с);

x – просторова координата (м);

λ – коефіцієнт гідравлічного опору;

D – діаметр труби (м);

K – коефіцієнт теплопередачі від труби до ґрунту $\left(\frac{\text{Дж}}{\text{м}^3} \cdot \text{с} \cdot \text{К} \right)$;

T_{gp} – температура ґрунту (К);

h – глибина залягання труби (м);

β – поправка Коріоліса на нерівномірний розподіл швидкостей в перетині;

g – прискорення вільного падіння ($\text{м} / \text{с}^2$);

E – повна енергія одиниці маси (Дж).

Для НН РТГ, не порушуючи спільності, введемо наступні припущення:

а) в рівнянні (2.3) нехтуємо кінетичною енергією в порівнянні з внутрішньою;

б) будемо враховувати ефект Джоуля-Томсона в рівнянні (2.3), оскільки розглядаємо труби великого діаметру;

в) швидкості потоку газу розподілені рівномірно в перерізі, тому поправка Коріоліса можна знехтувати.

Доповнимо первісну систему (2.1) – (2.3) рівнянням стану

$$\frac{P}{\rho} = zgRT, \quad (2.4)$$

де R – газова стала;

z – коефіцієнт стисливості газу.

В свою чергу, коефіцієнт стисливості газу можна описати формулою

$$z = z(P, T) = 1 + 0,07 \frac{P}{P_{кр}} \cdot \frac{T_{кр}}{T} \left(1 - 6 \frac{T_{кр}^2}{T^2} \right),$$

де $P_{кр}$ – критичний тиск газу;

$T_{кр}$ – критична температура газу.

Або ж рівносильною формулою

$$z = 1 - \left((P_{ср} - 6) \cdot (0,345 \cdot 10^{-2} \cdot \Delta - 0,446 \cdot 10^{-3}) + 0,015 \right) \times \\ \times \left(1,3 - 0,0144 \cdot (T_{ср} - 283,2) \right),$$

де $P_{ср}$ – середнє значення тиску газу;

$T_{ср}$ – середнє значення температури газу;

Δ – відносна щільність газу по повітрю.

Нехай питома масова витрата газу дорівнює

$$W = \rho V. \quad (2.5)$$

Перетворимо рівняння руху (2.1) використовуючи формули (2.4) і (2.5):

$$\frac{\partial W}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{W^2}{P} z g R T \right) = - \frac{P}{z g R T} \left(\frac{\lambda |W| W}{2D} \left(\frac{z g R T}{P} \right)^2 + g \frac{dh}{dx} \right),$$

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial W}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial x} + zgR \left(\frac{T}{P} \frac{\partial W^2}{\partial x} + W^2 \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{T}{P} \right) \right) + \frac{\lambda zgRT |W|W}{2DP} + \frac{Pg}{zgRT} \frac{dh}{dx} = 0, \\
& \frac{\partial W}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial x} + zgR \left(2 \frac{WT}{P} \frac{\partial W}{\partial x} + \frac{W^2}{P} \frac{\partial T}{\partial x} - T \frac{W^2}{P^2} \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \\
& \quad + \frac{\lambda zgRT |W|W}{2DP} + \frac{Pg}{zgRT} \frac{dh}{dx} = 0, \\
& \frac{\partial W}{\partial t} + \left(1 - zgRT \frac{W^2}{P^2} \right) \frac{\partial P}{\partial x} + 2zgRT \frac{W}{P} \frac{\partial W}{\partial x} + \\
& \quad + \frac{\lambda zgRT |W|W}{2DP} + \frac{Pg}{zgRT} \frac{dh}{dx} = 0. \tag{2.6}
\end{aligned}$$

Аналогічним чином перетворимо рівняння неперервності (2.2):

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{P}{zgRT} \right) + \frac{\partial W}{\partial x} = 0, \\
& \frac{1}{zgRT} \frac{\partial P}{\partial t} - \frac{P}{zgRT^2} \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial W}{\partial x} = 0, \\
& \frac{1}{zgRT} \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial W}{\partial x} = 0, \\
& \frac{\partial P}{\partial t} + zgRT \frac{\partial W}{\partial x} = 0.
\end{aligned}$$

Запишемо рівняння енергії (2.3), враховуючи ефект Джоуля-Томсона та нехтуючи при цьому кінетичною енергією, тобто

$$E = U_{внутр} = I - \frac{P}{\rho} = C_p T - C_p D_i P - \frac{P}{\rho} :$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho C_p T - C_p D_i P \rho - P) + \frac{\partial}{\partial x} (W (C_p T - C_p D_i P)) = \frac{4K}{D} (T_{cp} - T) - Wg \frac{dh}{dx},$$

$$\begin{aligned} (C_p T - C_p D_i P) \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{C_p P}{z g R T} \frac{\partial T}{\partial t} - (1 + C_p D_i \rho) \frac{\partial P}{\partial t} + (C_p T - C_p D_i P) \frac{\partial W}{\partial x} + \\ + C_p W \frac{\partial T}{\partial x} - C_p W D_i \frac{\partial P}{\partial x} = \frac{4K}{D} (T_{zp} - T) - W g \frac{dh}{dx}. \end{aligned}$$

Для подальшого розрахунку використаємо рівняння неперервності і виразимо його як $\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\frac{\partial W}{\partial x}$, а також врахуємо, що

$$\alpha = \frac{z g R}{S} \quad (2.7)$$

та отримаємо:

$$\begin{aligned} -(C_p T - C_p D_i P) \frac{\partial W}{\partial x} + \frac{C_p P}{z g R T} \frac{\partial T}{\partial t} - \left(1 + \frac{C_p D_i P}{z g R T}\right) \frac{\partial P}{\partial t} + (C_p T - C_p D_i P) \frac{\partial W}{\partial x} + \\ + C_p W \frac{\partial T}{\partial x} - C_p W D_i \frac{\partial P}{\partial x} = \frac{4K}{D} (T_{zp} - T) - W g \frac{dh}{dx}, \\ (\alpha S T + C_p D_i P) \frac{\partial W}{\partial x} + \frac{C_p P}{\alpha S T} \frac{\partial T}{\partial t} - C_p W D_i \frac{\partial P}{\partial x} + C_p W \frac{\partial T}{\partial x} = \\ = \frac{4K}{D} (T_{zp} - T) - W g \frac{dh}{dx}. \end{aligned} \quad (2.8)$$

Далі скористаємося рівнянням (2.6) та виразимо з нього $\frac{\partial W}{\partial t}$ враховуючи спочатку (2.7) і

$$\beta = \frac{\lambda \alpha}{2D}.$$

В результаті

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \left(\alpha ST \frac{W^2}{P^2} - 1 \right) \frac{\partial P}{\partial x} - 2\alpha ST \frac{W}{P} \frac{\partial W}{\partial x} - \beta ST \frac{|W|W}{P} - \frac{Pg}{\alpha ST} \frac{dh}{dx}$$

і підставивши у рівняння (2.8), отримаємо після всіх перетворень рівняння виду:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial t} + \left(\frac{\alpha^2 S^2 T^2}{PC_p} + \alpha STD_i \right) \frac{\partial W}{\partial x} - \frac{\alpha STD_i W}{P} \frac{\partial P}{\partial x} + \\ + \frac{\alpha STW}{P} \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{4K\alpha ST}{DPC_p} (T_{ep} - T) + \frac{\alpha STWg}{PC_p} \frac{dh}{dx}. \end{aligned}$$

Таким чином, остаточна система рівнянь має вигляд:

$$\frac{\partial W}{\partial t} + \left(1 - \alpha TS \frac{W^2}{P^2} \right) \frac{\partial P}{\partial x} + 2\alpha TS \frac{W}{P} \frac{\partial W}{\partial x} + \beta TS \frac{W|W|}{P} + \frac{g}{\alpha S T} \frac{P}{dx} \frac{dh}{dx} = 0, \quad (2.9)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \alpha TS \frac{\partial W}{\partial x} = 0, \quad (2.10)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial t} + \left(\frac{\alpha^2 S^2 T^2}{PC_p} + \alpha STD_i \right) \frac{\partial W}{\partial x} - \frac{\alpha STD_i W}{P} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\alpha STW}{P} \frac{\partial T}{\partial x} = \\ = \frac{4K\alpha ST}{DPC_p} (T_{ep} - T) + \frac{\alpha STWg}{PC_p} \frac{dh}{dx}, \end{aligned} \quad (2.11)$$

де S – площа поперечного перерізу труби;

C_p – питома теплоємність газу.

Запишемо для наочності систему рівнянь (2.9) – (2.11) в матричній формі:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + B(x, t, f) \frac{\partial f}{\partial x} = F(x, t, f), \quad (2.12)$$

де $f = (W(x,t), P(x,t), T(x,t))$ – вектор змінних питомої масової витрати, тиску і температури газу,

$$B(x, t, f) = \begin{bmatrix} 2\alpha TS \frac{W}{P} & 1 - \alpha TS \frac{W^2}{P^2} & 0 \\ \alpha TS & 0 & 0 \\ \frac{\alpha^2 S^2 T^2}{PC_P} + \alpha STD_i & -\frac{\alpha STD_i W}{P} & \frac{\alpha STW}{P} \end{bmatrix},$$

$$F(x, t, f) = \begin{bmatrix} -\beta TS \frac{W|W|}{P} - \frac{g}{\alpha S} \frac{P}{T} \frac{dh}{dx} \\ 0 \\ \frac{4K\alpha ST}{DPC_P} (T_{zp} - T) + \frac{\alpha STWg}{PC_P} \frac{dh}{dx} \end{bmatrix}.$$

Доповнемо систему рівнянь (2.12) початковими умовами (1.1) і граничними умовами на початку та наприкінці ділянки (1.2).

2.2 Математична модель НН РТГ по ДТ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона та кінетичної енергії

Для того, щоб врахувати кінетичну енергію і ефект Джоуля-Томсона в НН РТГ по ДТ, необхідно переписати вихідну систему квазілінійних ДР в частинних похідних гіперболічного типу (2.9) – (2.11), а саме рівняння енергії, з урахуванням коефіцієнта Джоуля-Томсона та кінетичної енергії.

Повна енергія запишеться через ентальпію I , враховуючи при цьому кінетичну енергію, $E = U_{внутр} + E_{кін} = I - \frac{P}{\rho} + \frac{v^2}{2} = C_P T - C_P D_i P - \frac{P}{\rho} + \frac{v^2}{2}$.

Остаточна ММ НН РТГ по ДТ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона та кінетичної енергії представлена у роботах [1, 2, 11] і має наступний вид:

$$\frac{\partial W}{\partial t} + \left(1 - \alpha TS \frac{W^2}{P^2}\right) \frac{\partial P}{\partial x} + 2\alpha TS \frac{W}{P} \frac{\partial W}{\partial x} + \beta TS \frac{W|W|}{P} + \frac{g}{\alpha S} \frac{P}{T} \frac{dh}{dx} = 0, \quad (2.13)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \alpha TS \frac{\partial W}{\partial x} = 0, \quad (2.14)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial t} + \left(\frac{\alpha^2 S^2 T^2}{PC_P} + \alpha STD_i\right) \frac{\partial W}{\partial x} + \left(-\frac{\alpha^2 S^2 T^2 W}{P^2 C_P} - \frac{\alpha STD_i W}{P}\right) \frac{\partial P}{\partial x} + \\ + \left(\frac{\alpha STW}{P} + \frac{\alpha^3 S^3 T^2 W^3}{P^3 C_P}\right) \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{4K\alpha ST}{DPC_P} (T_{zp} - T) + \frac{\alpha^2 \beta S^3 T^3 W^3}{P^3 C_P}. \end{aligned} \quad (2.15)$$

Система рівнянь (2.13) – (2.15) в матричній формі має вигляд:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + B(x, t, f) \frac{\partial f}{\partial x} = F(x, t, f), \quad (2.16)$$

де $f(x, t) = (W(x, t), P(x, t), T(x, t))$,

$$B(x, t, f) = \begin{bmatrix} 2\alpha TS \frac{W}{P} & 1 - \alpha TS \frac{W^2}{P^2} & 0 \\ \alpha TS & 0 & 0 \\ \frac{\alpha^2 S^2 T^2}{PC_P} + \alpha STD_i & -\frac{\alpha^2 S^2 T^2 W}{P^2 C_P} - \frac{\alpha STD_i W}{P} & \frac{\alpha STW}{P} + \frac{\alpha^3 S^3 T^2 W^3}{P^3 C_P} \end{bmatrix},$$

$$F(x, t, f) = \begin{bmatrix} -\beta TS \frac{W|W|}{P} - \frac{g}{\alpha S} \frac{P}{T} \frac{dh}{dx} \\ 0 \\ \frac{4K\alpha ST}{DPC_P} (T_{zp} - T) + \frac{\alpha^2 \beta S^3 T^3 W^3}{P^3 C_P} \end{bmatrix}.$$

До складу системи рівнянь (2.16) додамо початкові умови (1.1) і граничні умови на початку та наприкінці ділянки (1.2).

З ОБҐРУНТУВАННЯ МЕТОДУ ТА АЛГОРИТМУ РОЗВ'ЯЗАННЯ СИСТЕМИ РІВНЯНЬ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ НН РТГ ПО ДТ З ВИКОРИСТАННЯМ РСРС

Найбільш перспективним серед методів розрахунку НН РТГ є метод скінченних різниць з використанням неявних скінченно-різницевих схем [12]. Це зумовлено тим, що метод скінченних різниць має чіткий і простий процес дискретизації ДР, високу ефективність реалізації і швидкість розрахунку, є зручним для ітеративного процесу, добре інтерпретує результат, а також підходить для будь-якої структури мережі.

У кваліфікаційній роботі пропонується використовувати неявну скінченно-різницеву схему, так як у неї, на відміну від явної схеми, немає залежності стійкості алгоритму від співвідношення $\frac{\Delta x}{\Delta t}$, що призводить до необхідності брати дуже малі значення для дискрети за часом Δt . Також застосування неявних різницевих схем дозволяє проводити розрахунки з великими кроками за часом при довільному співвідношенні кроків різницевої сітки.

Перейдемо до опису методу розв'язання та алгоритму. Для отримання чисельного розв'язку систем (2.12) та (2.16) з початковим розподілом (1.1) та граничними умовами (1.2) розділимо відрізок $[0, L]$ на n частин довжиною Δx . Як наслідок отримаємо РСРС з n відрізками та $n+1$ точками розбиття x_i , $i = 0, \dots, n$.

Апроксимуємо похідні на початку та в кінці ділянки за схемами на рисунку 3.1, а похідні в i -й точці – за схемою на рисунку 3.2.

Похідні $\left. \frac{\partial f}{\partial t} \right|_i^k$ та $\left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_i^k$ замінюються наступними співвідношеннями:

$$\left. \frac{\partial f}{\partial t} \right|_i^k = \frac{f_i^k - f_i^{k-1}}{\tau}, \quad i = 0, \dots, n, \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial f}{\partial x} \Big|_i^k = \begin{cases} \frac{f_{i+1}^k - f_{i-1}^k}{2\Delta}, & i = 1, \dots, n-1, \\ \frac{f_1^k - f_0^k}{\Delta}, & i = 0, \\ \frac{f_n^k - f_{n-1}^k}{\Delta}, & i = n. \end{cases} \quad (3.2)$$

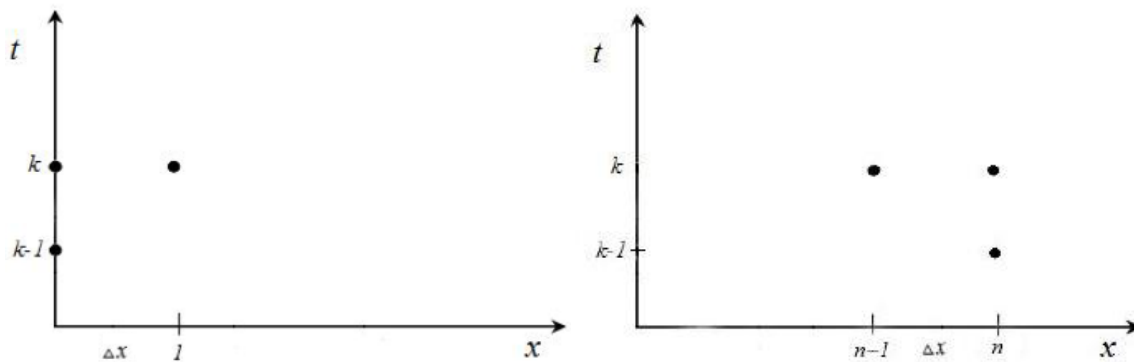


Рисунок 3.1 – Схеми апроксимації похідних на початку та в кінці ділянки

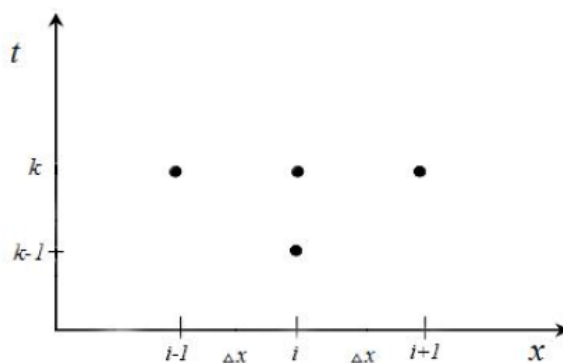


Рисунок 3.2 – Схема апроксимації похідних в i -й точці

Рівняння (2.12) та (2.16) враховуючи формули (3.1) і (3.2) записуються наступним чином:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{f_i^k - f_i^{k-1}}{\tau} + B_i^k \frac{f_{i+1}^k - f_{i-1}^k}{2\Delta} = F_i^k, \quad i=1, \dots, n-1, \\ \frac{f_0^k - f_0^{k-1}}{\tau} + B_0^k \frac{f_1^k - f_0^k}{\Delta} = F_0^k, \quad i=0, \\ \frac{f_n^k - f_n^{k-1}}{\tau} + B_n^k \frac{f_n^k - f_{n-1}^k}{\Delta} = F_n^k, \quad i=n, \end{array} \right.$$

або

$$\left\{ \begin{array}{l} -\frac{1}{2\Delta} B_i^k f_{i-1}^k + \frac{1}{\tau} f_i^k + \frac{1}{2\Delta} B_i^k f_{i+1}^k = F_i^k + \frac{1}{\tau} f_i^{k-1}, \quad i=1, \dots, n-1, \\ -\frac{1}{\Delta} B_0^k f_0^k + \frac{1}{\tau} f_0^k + \frac{1}{\Delta} B_0^k f_1^k = F_0^k + \frac{1}{\tau} f_0^{k-1}, \quad i=0, \\ -\frac{1}{\Delta} B_n^k f_{n-1}^k + \frac{1}{\tau} f_n^k + \frac{1}{\Delta} B_n^k f_n^k = F_n^k + \frac{1}{\tau} f_n^{k-1}, \quad i=n. \end{array} \right. \quad (3.3)$$

Таким чином, отримали систему нелінійних алгебраїчних рівнянь (3.3), розв'язком якої буде вектор

$$\begin{aligned} f^k &= (f_0^k, f_1^k, f_2^k, \dots, f_i^k, \dots, f_n^k) = \\ &= (W_0^k, P_0^k, T_0^k, W_1^k, P_1^k, T_1^k, W_2^k, P_2^k, T_2^k, \dots, W_i^k, P_i^k, T_i^k, \dots, W_n^k, P_n^k, T_n^k). \end{aligned}$$

Систему нелінійних рівнянь (3.3) будемо розв'язувати за допомогою методу Ньютона.

Отримаємо систему лінійних рівнянь

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial \psi_0^k}{\partial f_0^k} & \frac{\partial \psi_0^k}{\partial f_1^k} & \cdots & \frac{\partial \psi_0^k}{\partial f_n^k} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \frac{\partial \psi_i^k}{\partial f_0^k} & \frac{\partial \psi_i^k}{\partial f_1^k} & \cdots & \frac{\partial \psi_i^k}{\partial f_n^k} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \frac{\partial \psi_n^k}{\partial f_0^k} & \frac{\partial \psi_n^k}{\partial f_1^k} & \cdots & \frac{\partial \psi_n^k}{\partial f_n^k} \end{bmatrix}_{f^{k,s}} \cdot \begin{pmatrix} \delta f_0^{k,s+1} \\ \cdots \\ \delta f_i^{k,s+1} \\ \cdots \\ \delta f_n^{k,s+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \psi_0^{k,s} \\ \cdots \\ \psi_i^{k,s} \\ \cdots \\ \psi_n^{k,s} \end{pmatrix},$$

або у більш загальному вигляді

$$\left[\frac{\partial \psi^k}{\partial f^k} \right]_{f^{k,s}} \delta f^{k,s+1} = \psi^{k,s}, \quad (3.4)$$

де $\delta f^{k,s+1}$ – вектор поправок до невідомих на $(s+1)$ -й ітерації, тобто $f^{k,s+1} = f^{k,s} - \delta f^{k,s+1}$;

$\psi^{k,s}$ – вектор нев'язок на s -й ітерації;

$\left[\frac{\partial \psi^k}{\partial f^k} \right]_{f^{k,s}}$ – матриця Якобі, яка визначена на розв'язку, отриманому на s -й

ітерації;

$f^{k,s+1}$ – вектор розв'язку системи на $(s+1)$ -й ітерації.

Система (3.4) розв'язується щодо векторів поправок до невідомих.

Вектори нев'язок в граничних точках 0 та n для k -го часового шару мають вигляд:

$$\psi_0^{k,s} = \frac{1}{\tau} f_0^{k,s} - \frac{1}{\Delta} B_0^{k,s} f_0^{k,s} + \frac{1}{\Delta} B_0^{k,s} f_1^{k,s} - F_0^{k,s} - \frac{1}{\tau} f_0^{k-1}, \quad (3.5)$$

$$\psi_n^{k,s} = \frac{1}{\tau} f_n^{k,s} + \frac{1}{\Delta} B_n^{k,s} f_n^{k,s} - \frac{1}{\Delta} B_n^{k,s} f_{n-1}^{k,s} - F_n^{k,s} - \frac{1}{\tau} f_n^{k-1}. \quad (3.6)$$

Для внутрішніх точок ділянки ($i = 1, \dots, n-1$) на s -й ітерації k -го часового шару вектори нев'язок обчислюються за формулою:

$$\psi_i^{k,s} = -\frac{1}{2\Delta} B_i^{k,s} f_{i-1}^{k,s} + \frac{1}{\tau} f_i^{k,s} + \frac{1}{2\Delta} B_i^{k,s} f_{i+1}^{k,s} - F_i^{k,s} - \frac{1}{\tau} f_i^{k-1}. \quad (3.7)$$

Матриця похідних $\left[\frac{\partial \psi^k}{\partial f^k} \right]_{f^{k,s}}$ з урахуванням (3.6) – (3.8) буде мати наступну

структуру:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial \psi_0^k}{\partial f_0^k} & \frac{1}{\Delta} B_0^{k,s} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{2\Delta} B_1^{k,s} & \frac{\partial \psi_1^k}{\partial f_1^k} & \frac{1}{2\Delta} B_1^{k,s} & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & -\frac{1}{2\Delta} B_i^{k,s} & \frac{\partial \psi_i^k}{\partial f_i^k} & \frac{1}{2\Delta} B_i^{k,s} & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & -\frac{1}{2\Delta} B_{n-2}^{k,s} & \frac{\partial \psi_{n-2}^k}{\partial f_{n-2}^k} & \frac{1}{2\Delta} B_{n-2}^{k,s} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{2\Delta} B_{n-1}^{k,s} & \frac{\partial \psi_{n-1}^k}{\partial f_{n-1}^k} & \frac{1}{2\Delta} B_{n-1}^{k,s} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{\Delta} B_n^{k,s} & \frac{\partial \psi_n^k}{\partial f_n^k} \end{bmatrix}.$$

Згідно формули (3.7) з урахуванням системи (2.12) запишемо вирази для координат вектору нев'язок $\psi_i^{k,s}$:

$$\psi_{i,1} = \frac{1}{\tau} (W_i - W_i^{k-1}) + \frac{1}{2\Delta} \left(\left(1 - \alpha T_i S \frac{W_i^2}{P_i^2} \right) (P_{i+1} - P_{i-1}) + \right.$$

$$+2\alpha T_i S \frac{W_i}{P_i} (W_{i+1} - W_{i-1}) \Big) + \beta T_i S \frac{W_i |W_i|}{P_i} + \frac{g}{\alpha S} \frac{P_i}{T_i} \frac{dh}{dx}, \quad (3.8)$$

$$\psi_{i,2} = \frac{1}{\tau} (P_i - P_i^{k-1}) + \frac{1}{2\Delta} \alpha T_i S (W_{i+1} - W_{i-1}), \quad (3.9)$$

$$\begin{aligned} \psi_{i,3} = & \frac{1}{\tau} (T_i - T_i^{k-1}) + \frac{1}{2\Delta} \left(\frac{\alpha S T_i W_i}{P_i} (T_{i+1} - T_{i-1}) + \left(\frac{\alpha^2 S^2 T_i^2}{P_i C_P} + \alpha S T_i D_i \right) (W_{i+1} - W_{i-1}) - \right. \\ & \left. - \frac{\alpha S T_i D_i W_i}{P_i} (P_{i+1} - P_{i-1}) \right) - \frac{4K\alpha S T_i}{D P_i C_P} (T_{zp} - T_i) - \frac{\alpha S T_i W_i g}{P_i C_P} \frac{dh}{dx}. \end{aligned} \quad (3.10)$$

Вирази для визначення координат векторів нев'язок $\psi_0^{k,s}$ і $\psi_n^{k,s}$, за допомогою формул (3.5) та (3.6), запишуться наступним чином:

$$\begin{aligned} \psi_{0,1} = & \frac{1}{\tau} (W_0 - W_0^{k-1}) + \frac{1}{\Delta} \left(\left(1 - \alpha T_0 S \frac{W_0^2}{P_0^2} \right) (P_1 - P_0) + \right. \\ & \left. + 2\alpha T_0 S \frac{W_0}{P_0} (W_1 - W_0) \right) + \beta T_0 S \frac{W_0 |W_0|}{P_0} + \frac{g}{\alpha S} \frac{P_0}{T_0} \frac{dh}{dx}, \end{aligned} \quad (3.11)$$

$$\psi_{0,2} = \frac{1}{\tau} (P_0 - P_0^{k-1}) + \frac{1}{\Delta} \alpha T_0 S (W_1 - W_0), \quad (3.12)$$

$$\begin{aligned} \psi_{0,3} = & \frac{1}{\tau} (T_0 - T_0^{k-1}) + \frac{1}{\Delta} \left(\frac{\alpha S T_0 W_0}{P_0} (T_1 - T_0) + \left(\frac{\alpha^2 S^2 T_0^2}{P_0 C_P} + \alpha S T_0 D_i \right) (W_1 - W_0) - \right. \\ & \left. - \frac{\alpha S T_0 D_i W_0}{P_0} (P_1 - P_0) \right) - \frac{4K\alpha S T_0}{D P_0 C_P} (T_{zp} - T_0) - \frac{\alpha S T_0 W_0 g}{P_0 C_P} \frac{dh}{dx}, \end{aligned} \quad (3.13)$$

$$\begin{aligned} \psi_{n,1} = & \frac{1}{\tau} (W_n - W_n^{k-1}) + \frac{1}{\Delta} \left(\left(1 - \alpha T_n S \frac{W_n^2}{P_n^2} \right) (P_n - P_{n-1}) + \right. \\ & \left. + 2\alpha T_n S \frac{W_n}{P_n} (W_n - W_{n-1}) \right) + \beta T_n S \frac{W_n |W_n|}{P_n} + \frac{g}{\alpha S} \frac{P_n}{T_n} \frac{dh}{dx}, \end{aligned} \quad (3.14)$$

$$\psi_{n,2} = \frac{1}{\tau} (P_n - P_n^{k-1}) + \frac{1}{\Delta} \alpha T_n S (W_n - W_{n-1}), \quad (3.15)$$

$$\begin{aligned} \psi_{n,3} = & \frac{1}{\tau} (T_n - T_n^{k-1}) + \frac{1}{\Delta} \left(\frac{\alpha S T_n W_n}{P_n} (T_n - T_{n-1}) + \left(\frac{\alpha^2 S^2 T_n^2}{P_n C_P} + \alpha S T_n D_i \right) (W_n - W_{n-1}) - \right. \\ & \left. - \frac{\alpha S T_n D_i W_n}{P_n} (P_n - P_{n-1}) \right) - \frac{4K\alpha S T_n}{D P_n C_P} (T_{cp} - T_n) - \frac{\alpha S T_n W_n g}{P_n C_P} \frac{dh}{dx}. \end{aligned} \quad (3.16)$$

Запишемо елементи матриці Якобі $\left[\frac{\partial \psi}{\partial f} \right]_i^{k,s}$ для рівнянь (3.8) – (3.10):

$$\frac{\partial \psi_{i,1}}{\partial W_i} = \frac{1}{\tau} + \frac{1}{2\Delta} \left(-2\alpha T_i S \frac{W_i}{P_i^2} (P_{i+1} - P_{i-1}) + 2\alpha T_i S \frac{W_{i+1} - W_{i-1}}{P_i} \right) + 2\beta T_i S \frac{|W_i|}{P_i},$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \psi_{i,1}}{\partial P_i} = & \frac{1}{2\Delta} \left(2\alpha T_i S \frac{W_i^2}{P_i^3} (P_{i+1} - P_{i-1}) - \right. \\ & \left. - 2\alpha T_i S \frac{W_i}{P_i^2} (W_{i+1} - W_{i-1}) \right) - \beta T_i S \frac{W_i |W_i|}{P_i^2} + \frac{g}{\alpha S T_i} \frac{dh}{dx}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \psi_{i,1}}{\partial T_i} = & \frac{1}{2\Delta} \left(-\alpha S \frac{W_i^2}{P_i^2} (P_{i+1} - P_{i-1}) + \right. \\ & \left. + 2\alpha S \frac{W_i}{P_i} (W_{i+1} - W_{i-1}) \right) + \beta S \frac{W_i |W_i|}{P_i} - \frac{g}{\alpha S T_i^2} \frac{dh}{dx}, \end{aligned}$$

$$\frac{\partial \psi_{i,2}}{\partial W_i} = 0,$$

$$\frac{\partial \psi_{i,2}}{\partial P_i} = \frac{1}{\tau},$$

$$\frac{\partial \psi_{i,2}}{\partial T_i} = \frac{1}{2\Delta} \alpha S (W_{i+1} - W_{i-1}),$$

$$\frac{\partial \psi_{i,3}}{\partial W_i} = \frac{1}{2\Delta} \left(\frac{\alpha S T_i}{P_i} (T_{i+1} - T_{i-1}) - \frac{\alpha S T_i D_i}{P_i} (P_{i+1} - P_{i-1}) \right) - \frac{\alpha S T_i g}{P_i C_P} \frac{dh}{dx},$$

$$\frac{\partial \psi_{i,3}}{\partial P_i} = \frac{1}{2\Delta} \left(-\frac{\alpha S T_i W_i}{P_i^2} (T_{i+1} - T_{i-1}) - \frac{\alpha^2 S^2 T_i^2}{P_i^2 C_P} (W_{i+1} - W_{i-1}) + \right.$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{\alpha ST_i D_i W_i}{P_i^2} (P_{i+1} - P_{i-1}) \Big) + \frac{4K\alpha ST_i}{DP_i^2 C_P} (T_{zp} - T_i) + \frac{\alpha ST_i W_i g}{P_i^2 C_P} \frac{dh}{dx}, \\
\frac{\partial \psi_{i,3}}{\partial T_i} &= \frac{1}{\tau} + \frac{1}{2\Delta} \left(\frac{\alpha S W_i}{P_i} (T_{i+1} - T_{i-1}) + \left(\frac{2\alpha^2 S^2 T_i}{P_i C_P} + \alpha S D_i \right) (W_{i+1} - W_{i-1}) - \right. \\
& \left. - \frac{\alpha S D_i W_i}{P_i} (P_{i+1} - P_{i-1}) \right) - \frac{4K\alpha S}{DP_i C_P} (T_{zp} - 2T_i) - \frac{\alpha S W_i g}{P_i C_P} \frac{dh}{dx}.
\end{aligned}$$

Для рівнянь (3.11) – (3.13) елементи матриці Якобі набудуть наступний вигляд:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \psi_{0,1}}{\partial W_0} &= \frac{1}{\tau} + \frac{1}{\Delta} \left(-2\alpha T_0 S \frac{W_0}{P_0^2} (P_1 - P_0) + \frac{2\alpha T_0 S}{P_0} (W_1 - 2W_0) \right) + 2\beta T_0 S \frac{|W_0|}{P_0}, \\
\frac{\partial \psi_{0,1}}{\partial P_0} &= \frac{1}{\Delta} \left(\alpha T_0 S \frac{W_0^2}{P_0^3} (2P_1 - P_0) - 1 - 2\alpha T_0 S \frac{W_0}{P_0^2} (W_1 - W_0) \right) - \beta T_0 S \frac{W_0 |W_0|}{P_0^2} + \frac{g}{\alpha S T_0} \frac{dh}{dx}, \\
\frac{\partial \psi_{0,1}}{\partial T_0} &= \frac{1}{\Delta} \left(-\alpha S \frac{W_0^2}{P_0^2} (P_1 - P_0) + 2\alpha S \frac{W_0}{P_0} (W_1 - W_0) \right) + \beta S \frac{W_0 |W_0|}{P_0} - \frac{g}{\alpha S T_0^2} \frac{dh}{dx}, \\
\frac{\partial \psi_{0,2}}{\partial W_0} &= -\frac{1}{\Delta} \alpha T_0 S, \\
\frac{\partial \psi_{0,2}}{\partial P_0} &= \frac{1}{\tau}, \\
\frac{\partial \psi_{0,2}}{\partial T_0} &= \frac{1}{\Delta} \alpha S (W_1 - W_0), \\
\frac{\partial \psi_{0,3}}{\partial W_0} &= \frac{1}{\Delta} \left(\frac{\alpha S T_0}{P_0} (T_1 - T_0) - \frac{\alpha^2 S^2 T_0^2}{P_0 C_P} - \alpha S T_0 D_i - \frac{\alpha S T_0 D_i}{P_0} (P_1 - P_0) \right) - \frac{\alpha S T_0 g}{P_0 C_P} \frac{dh}{dx}, \\
\frac{\partial \psi_{0,3}}{\partial P_0} &= \frac{1}{\Delta} \left(-\frac{\alpha S T_0 W_0}{P_0^2} (T_1 - T_0) - \frac{\alpha^2 S^2 T_0^2}{P_0^2 C_P} (W_1 - W_0) + \right. \\
& \left. + \frac{\alpha S T_0 D_i W_0}{P_0^2} P_1 \right) + \frac{4K\alpha S T_0}{DP_0^2 C_P} (T_{zp} - T_0) + \frac{\alpha S T_0 W_0 g}{P_0^2 C_P} \frac{dh}{dx},
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \psi_{0,3}}{\partial T_0} = & \frac{1}{\tau} + \frac{1}{\Delta} \left(\frac{\alpha S W_0}{P_0} (T_1 - 2T_0) + \left(\frac{2\alpha^2 S^2 T_0}{P_0 C_P} + \alpha S D_i \right) (W_1 - W_0) - \right. \\ & \left. - \frac{\alpha S D_i W_0}{P_0} (P_1 - P_0) \right) - \frac{4K\alpha S}{D P_0 C_P} (T_{zp} - 2T_0) - \frac{\alpha S W_0 g}{P_0 C_P} \frac{dh}{dx}. \end{aligned}$$

Елементи матриці Якобі для рівнянь (3.14) – (3.16) приймуть вигляд:

$$\frac{\partial \psi_{n,1}}{\partial W_n} = \frac{1}{\tau} + \frac{1}{\Delta} \left(-2\alpha T_n S \frac{W_n}{P_n^2} (P_n - P_{n-1}) + \frac{2\alpha T_n S}{P_n} (2W_n - W_{n-1}) \right) + 2\beta T_n S \frac{|W_n|}{P_n},$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \psi_{n,1}}{\partial P_n} = & \frac{1}{\Delta} \left(1 + \alpha T_n S \frac{W_n^2}{P_n^3} (P_n - 2P_{n-1}) - \right. \\ & \left. - 2\alpha T_n S \frac{W_n}{P_n^2} (W_n - W_{n-1}) \right) - \beta T_n S \frac{W_n |W_n|}{P_n^2} + \frac{g}{\alpha S T_n} \frac{dh}{dx}, \end{aligned}$$

$$\frac{\partial \psi_{n,1}}{\partial T_n} = \frac{1}{\Delta} \left(-\alpha S \frac{W_n^2}{P_n^2} (P_n - P_{n-1}) + 2\alpha S \frac{W_n}{P_n} (W_n - W_{n-1}) \right) + \beta S \frac{W_n |W_n|}{P_n} - \frac{g}{\alpha S} \frac{P_n}{T_n^2} \frac{dh}{dx},$$

$$\frac{\partial \psi_{n,2}}{\partial W_n} = \frac{1}{\Delta} \alpha T_n S,$$

$$\frac{\partial \psi_{n,2}}{\partial P_n} = \frac{1}{\tau},$$

$$\frac{\partial \psi_{n,2}}{\partial T_n} = \frac{1}{\Delta} \alpha S (W_n - W_{n-1}),$$

$$\frac{\partial \psi_{n,3}}{\partial W_n} = \frac{1}{\Delta} \left(\frac{\alpha S T_n}{P_n} (T_n - T_{n-1}) + \frac{\alpha^2 S^2 T_n^2}{P_n C_P} + \alpha S T_n D_i - \frac{\alpha S T_n D_i}{P_n} (P_n - P_{n-1}) \right) - \frac{\alpha S T_n g}{P_n C_P} \frac{dh}{dx},$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \psi_{n,3}}{\partial P_n} = & \frac{1}{\Delta} \left(-\frac{\alpha S T_n W_n}{P_n^2} (T_n - T_{n-1}) - \frac{\alpha^2 S^2 T_n^2}{P_n^2 C_P} (W_n - W_{n-1}) - \right. \\ & \left. - \frac{\alpha S T_n D_i W_n}{P_n^2} P_{n-1} \right) + \frac{4K\alpha S T_n}{D P_n^2 C_P} (T_{zp} - T_n) + \frac{\alpha S T_n W_n g}{P_n^2 C_P} \frac{dh}{dx}, \end{aligned}$$

$$\frac{\partial \psi_{n,3}}{\partial T_n} = \frac{1}{\tau} + \frac{1}{\Delta} \left(\frac{\alpha S W_n}{P_n} (2T_n - T_{n-1}) + \left(\frac{2\alpha^2 S^2 T_n}{P_n C_P} + \alpha S D_i \right) (W_n - W_{n-1}) - \frac{\alpha S D_i W_n}{P_n} (P_n - P_{n-1}) \right) - \frac{4K\alpha S}{D P_n C_P} (T_{zp} - 2T_n) - \frac{\alpha S W_n g}{P_n C_P} \frac{dh}{dx}.$$

Зауважимо, що у всіх формулах для компонент нев'язок і матриці Якобі для зручності сприйняття опущені індекси k та s .

Для системи (2.16) аналогічним чином отримаємо вирази для координат векторів нев'язок $\psi_i^{k,s}$, $\psi_0^{k,s}$ і $\psi_n^{k,s}$, а також елементи матриці Якобі для цих нев'язок.

Наведемо алгоритм розрахунку НН РТГ по ДТ для k -го часового шару [12]:

- 1) задання вектора початкових значень параметрів $f^{k,0}$;
- 2) обчислення нев'язок $\psi^{k,s}$ для всіх точок ДТ;
- 3) розрахунок матриці Якобі $\left[\frac{\partial \psi^k}{\partial f^k} \right]_{f^{k,s}}$ для всіх точок ДТ;
- 4) визначення поправок шляхом розв'язання лінійної системи алгебраїчних рівнянь (3.4);
- 5) обчислення нових значень невідомих параметрів газового потоку на $(s+1)$ -й ітерації

$$f^{k,s+1} = f^{k,s} - \delta f^{k,s+1}, \quad i = 0, \dots, n;$$

- б) перевірка збіжності $\|\psi^{k,s+1}\| \leq \varepsilon$, де ε – задана точність, $\psi^{k,s+1} = (\psi_{0,1}^{k,s+1}, \psi_{0,2}^{k,s+1}, \psi_{0,3}^{k,s+1}, \dots, \psi_{n,3}^{k,s+1})$. Якщо задана точність не досягнута, то $s = s + 1$ і переходимо до п. 2), в іншому випадку – до п. 7);

- 7) завершення розрахунку часового шару.

4 ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ

4.1 Система комп'ютерної алгебри Mathematica 11.1

Насамперед розберемо що таке системи комп'ютерної алгебри або, так звані, системи комп'ютерної математики – це клас програмного забезпечення (комп'ютерна програма або пакет програм), що дозволяє виконувати найрізноманітніші математичні операції та перетворення алгебраїчних виразів, заданих в чисельній та символній (змінні, функції, поліноми, матриці тощо) формах.

Усі широко відомі системи комп'ютерної алгебри дозволяють проводити як символні обчислення, так і використовувати чисельні методи. Сьогодні такі системи є одним із основних обчислювальних інструментів комп'ютерного моделювання та знаходять застосування у різних галузях науки [13].

Система Wolfram Mathematica використовується в різних дисциплінах – фізиці, біології, соціальних та інших науках. Вона містить багато функцій як для аналітичних перетворень, так і для чисельних розрахунків. Крім того, програма підтримує роботу з графікою і звуком, включаючи побудову дво- і тривимірних графіків функцій, малювання довільних геометричних фігур, імпорт та експорт зображень і звуку.

Бібліотека програм Wolfram Mathematica – це постійно розширювальна збірка складного програмного забезпечення, яка створена для вирішення технічних і обчислювальних завдань для різних специфічних областей. Довідкова база системи вміщує в себе обсяг інформації, еквівалентний десяткам товстих довідників і при цьому відрізняється дуже швидким пошуком потрібної інформації по ряду критеріїв.

Wolfram Mathematica орієнтована на користувача, який не є професіоналом в області програмування, а має тільки початкову підготовку з основ інформатики та обчислювальної техніки. Користувач, що володіє хоча б мінімальним досвідом роботи з операційною системою Windows та її стандартними додатками, буде легко орієнтуватися в головному меню програми.

Проаналізувавши основні характеристики та функціональні можливості програмних засобів, для виконання поставлених задач був обраний пакет Wolfram Mathematica 11.1, тому що даний пакет, з точки зору автора, є найбільш оптимальним для проведення теоретичного і чисельного аналізу, і, зокрема, для комп'ютерного моделювання НН РТГ по ДТ великого діаметру з урахуванням кінетичної енергії.

4.2 Опис програми

Програма розрахунку НН РТГ по ДТ була створена за допомогою математичного пакету Wolfram Mathematica 11.1.

Для початку необхідно задати наступні параметри:

- а) технічні параметри ДТ (довжину та внутрішній діаметр ділянки, товщину стінок труби, еквівалентну шорсткість труб тощо);
- б) фізичні параметри газу (питому теплоємність, коефіцієнт стисливості газу, коефіцієнт теплопередачі від газу до ґрунту тощо);
- в) інші параметри (комерційну витрату газу, тиск і температуру газу на початку ділянки тощо).

Далі задамо граничні умови на початку та в кінці ділянки, кількість точок розбиття ДТ, крок по часовій змінній та часовий інтервал розрахунку.

Після задання початкових даних переходимо до реалізації самого алгоритму розрахунку РТГ. Алгоритм розрахунку наведено в розділі 3.

Результатом роботи програми є значення параметрів газового потоку, а саме масової витрати, тиску та температури, в точках розбиття ДТ.

5 РЕЗУЛЬТАТИ ОБЧИСЛЮВАЛЬНОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ ТА ЇХ АНАЛІЗ

Для розв'язання поставленої задачі розрахунку НН РТГ по ДТ великого діаметру, був створений програмний продукт, який дозволяє розраховувати нестационарні режими з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона або з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона та кінетичної енергії. Код програмного продукту та результати програмного обчислення наведені у додатку А кваліфікаційної роботи.

Спочатку задамо технічні характеристики ДТ та фізичні параметри газу: довжина ділянки $L=112$ км, діаметр труби $D=1400$ мм, товщина стінок $\delta=10$ мм, еквівалентна шорсткість труб $K_{шор}=0,03$ мм, коефіцієнт ефективності $E=0,95$, питома теплоємність $C_p=0,655952$, коефіцієнт стисливості газу $z=0,9$, коефіцієнт теплопередачі $K=1,4$, відносна щільність газу по повітря $\Delta=0,604707$.

Температура ґрунту на глибині залягання газопроводу $T_{gp}=10^\circ C$.

Крок по часовій змінній $\tau=5$ хвилин, часовий інтервал розрахунку $T_{max}=780$ хвилин, точність розрахунків $\varepsilon=10^{-6}$.

Далі задамо початкові дані: тиск газу на початку ділянки $P_{поч}=84,64$ атм, температуру газу на початку ділянки $T_n=39,8^\circ C$, комерційну витрату газу $q=101,9$ млн.м³/доб.

В кваліфікаційній роботі для порівняння параметрів перехідного РТГ двох ММ проведені розрахунки двох типів задач:

- підключення великих споживачів до системи газопостачання;
- відключення великих споживачів від системи газопостачання.

Розрахуємо значення параметрів газового потоку для підключення великих споживачів.

Граничні умови на початку та в кінці ділянки:

$$\begin{cases} P(0,t) = 84,64 \text{ атм}, \\ T(0,t) = 39,8^\circ\text{C}, \end{cases} \quad G(L,t) = \begin{cases} 101,9 \frac{\text{млн.м}^3}{\text{доб}}, t < 200 \text{ хв}, \\ 116,9 \frac{\text{млн.м}^3}{\text{доб}}, t \geq 200 \text{ хв}. \end{cases}$$

Розглянемо розподіл параметрів газового потоку (витрати, тиску, температури) на обраних часових шарах при різній кількості точок розбиття n , а саме оберемо $n=5$ та $n=10$. Різка зміна граничних умов, яка пов'язана з підключенням споживача, відбувається починаючи з 40-го часового шару.

Якщо кількість точок розбиття дорівнюватиме $n=5$, то отримаємо наступні результати: параметри газового потоку на обраних часових шарах для двох ММ НН РТГ (табл. 5.1 – 5.7); графіки значення витрат газу (рис. 5.1 – 5.6), тиску (рис. 5.7 – 5.12) та температури (рис. 5.13 – 5.18) для двох ММ НН РТГ в 0-й, 3-й і 5-й точці розбиття.

Таблиця 5.1 – Параметри газового потоку на 1-у часовому шарі ($n=5$)

ММ НН РТГ по ДТ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона				ММ НН РТГ по ДТ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона та кінетичної енергії		
x , км	q , млн.м ³ /доб	P , атм	T , °C	q , млн.м ³ /доб	P , атм	T , °C
0,0	104,129835	84,640000	39,800000	104,129874	84,640000	39,800000
22,4	103,479402	80,491745	36,577367	103,479492	80,491742	36,576794
44,8	103,597883	76,118020	33,475444	103,597992	76,118019	33,474670
67,2	103,323849	71,548505	30,538971	103,323947	71,548504	30,538216
89,6	103,270091	66,746884	27,771791	103,270224	66,746889	27,770539
112,0	101,900000	61,606495	25,143162	101,900000	61,606509	25,147692

Таблиця 5.2 – Параметри газового потоку на 39-у часовому шарі ($n = 5$)

ММ НН РТГ по ДТ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона				ММ НН РТГ по ДТ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона та кінетичної енергії		
x , км	q , млн.м ³ /доб	P , атм	T , °C	q , млн.м ³ /доб	P , атм	T , °C
0,0	101,971254	84,640000	39,800000	101,973372	84,640000	39,800000
22,4	101,958038	80,670389	36,696558	101,954266	80,670230	36,740257
44,8	101,960517	76,394385	33,558464	101,962506	76,393817	33,495496
67,2	101,939795	72,050443	30,829428	101,937651	72,051654	30,909344
89,6	101,926296	67,339011	27,990514	101,926817	67,336595	27,898654
112,0	101,900000	62,453510	25,453847	101,900000	62,457205	25,534325

Таблиця 5.3 – Параметри газового потоку на 40-у часовому шарі ($n = 5$)

ММ НН РТГ по ДТ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона				ММ НН РТГ по ДТ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона та кінетичної енергії		
x , км	q , млн.м ³ /доб	P , атм	T , °C	q , млн.м ³ /доб	P , атм	T , °C
0,0	102,215580	84,640000	39,800000	102,218027	84,640000	39,800000
22,4	102,489572	80,650002	36,684420	102,485366	80,649816	36,731343
44,8	102,638271	76,301423	33,476938	102,641216	76,300829	33,411902
67,2	104,437183	71,898850	30,703763	104,433929	71,899941	30,784051
89,6	105,843225	66,755819	27,459351	105,847846	66,753451	27,355646
112,0	116,900000	61,429029	24,462864	116,900000	61,432404	24,680437

Таблиця 5.4 – Параметри газового потоку на 41-у часовому шарі ($n = 5$)

ММ НН РТГ по ДТ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона				ММ НН РТГ по ДТ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона та кінетичної енергії		
x , км	q , млн.м ³ /доб	P , атм	T , °C	q , млн.м ³ /доб	P , атм	T , °C
0,0	102,736426	84,640000	39,800000	102,739668	84,640000	39,800000
22,4	103,309850	80,607774	36,659203	103,304988	80,607524	36,709338
44,8	103,612053	76,160769	33,360491	103,616474	76,160173	33,293362
67,2	106,257753	71,673140	30,525147	106,253568	71,674001	30,606981
89,6	108,386780	66,258500	27,047967	108,394769	66,256140	26,925888
112,0	116,900000	60,642091	23,758920	116,900000	60,645385	24,068370

Таблиця 5.5 – Параметри газового потоку на 42-у часовому шарі ($n = 5$)

ММ НН РТГ по ДТ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона				ММ НН РТГ по ДТ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона та кінетичної енергії		
x , км	q , млн.м ³ /доб	P , атм	T , °C	q , млн.м ³ /доб	P , атм	T , °C
0,0	103,453324	84,640000	39,800000	103,457702	84,640000	39,800000
22,4	104,238836	80,550274	36,627292	104,233197	80,549934	36,680702
44,8	104,645719	76,001105	33,236084	104,651779	76,000518	33,166823
67,2	107,586533	71,420152	30,332937	107,581453	71,420734	30,417856
89,6	110,000865	65,823750	26,721134	110,011362	65,821362	26,576459
112,0	116,900000	60,005470	23,239386	116,900000	60,008940	23,609151

Таблиця 5.6 – Параметри газового потоку на 98-у часовому шарі ($n = 5$)

ММ НН РТГ по ДТ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона				ММ НН РТГ по ДТ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона та кінетичної енергії		
x , км	q , млн.м ³ /доб	P , атм	T , °C	q , млн.м ³ /доб	P , атм	T , °C
0,0	116,697730	84,640000	39,800000	116,686430	84,640000	39,800000
22,4	116,722059	79,439934	36,497653	116,713492	79,440938	36,948204
44,8	116,726612	73,670441	33,143977	116,715525	73,656215	33,122792
67,2	116,782608	67,736937	30,071390	116,773930	67,738710	30,456309
89,6	116,820873	61,055721	26,820897	116,814772	61,027664	26,647943
112,0	116,900000	53,879211	23,647963	116,900000	53,884036	23,974909

Таблиця 5.7 – Параметри газового потоку на 156-у часовому шарі ($n = 5$)

ММ НН РТГ по ДТ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона				ММ НН РТГ по ДТ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона та кінетичної енергії		
x , км	q , млн.м ³ /доб	P , атм	T , °C	q , млн.м ³ /доб	P , атм	T , °C
0,0	116,896506	84,640000	39,800000	116,896713	84,640000	39,800000
22,4	116,896478	79,422283	36,560477	116,896688	79,422264	36,953776
44,8	116,896842	73,633067	33,190252	116,897051	73,619035	33,138517
67,2	116,897866	67,677532	30,113306	116,897744	67,677215	30,510307
89,6	116,898826	60,980737	26,837002	116,898773	60,950089	26,717345
112,0	116,900000	53,783648	23,763247	116,900000	53,781890	24,155315

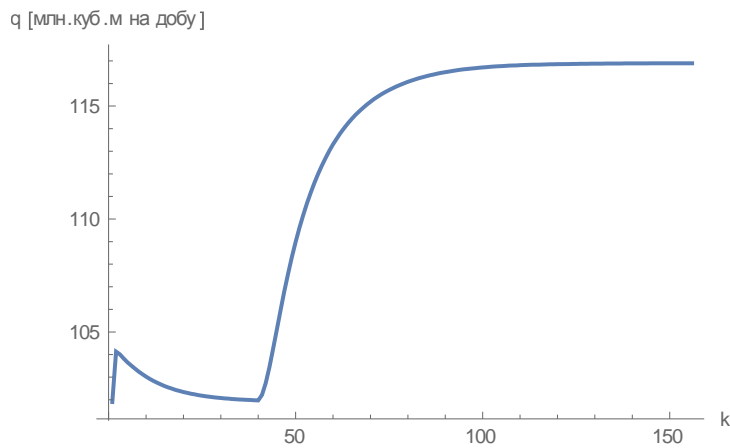


Рисунок 5.1 – Значення витрат газу в 0-й точці розбиття для ММ НН РТГ по ДТ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона

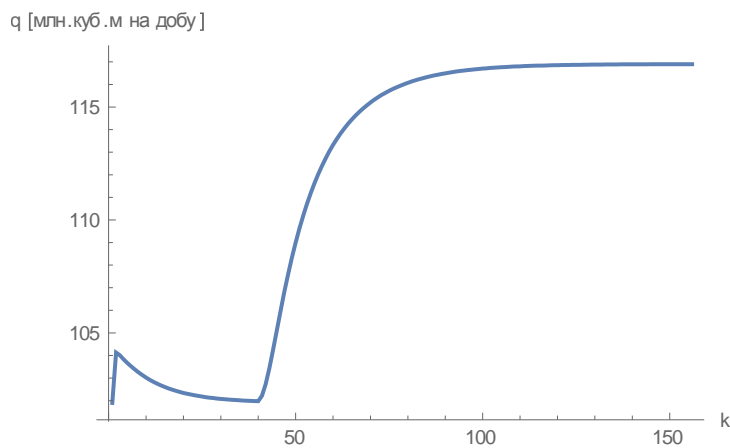


Рисунок 5.2 – Значення витрат газу в 0-й точці розбиття для ММ НН РТГ по ДТ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона та кінетичної енергії

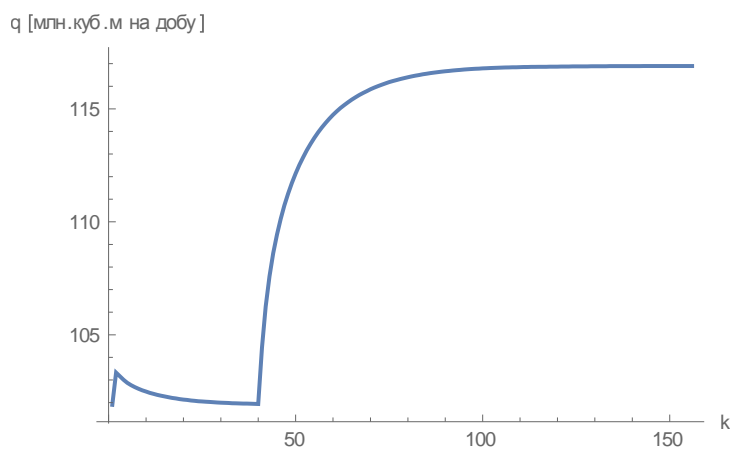


Рисунок 5.3 – Значення витрат газу в 3-й точці розбиття для ММ НН РТГ по ДТ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона

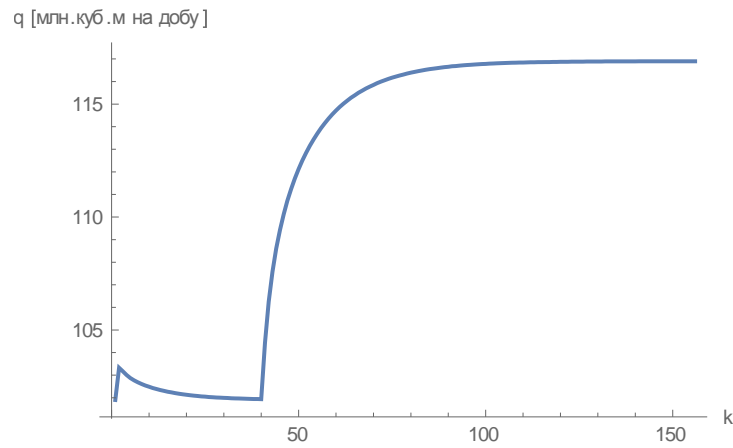


Рисунок 5.4 – Значення витрат газу в 3-й точці розбиття для ММ НН РТГ по ДТ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона та кінетичної енергії

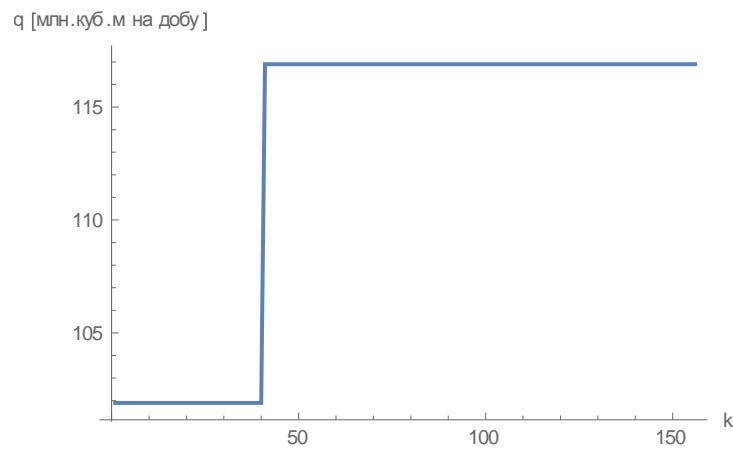


Рисунок 5.5 – Значення витрат газу в 5-й точці розбиття для ММ НН РТГ по ДТ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона

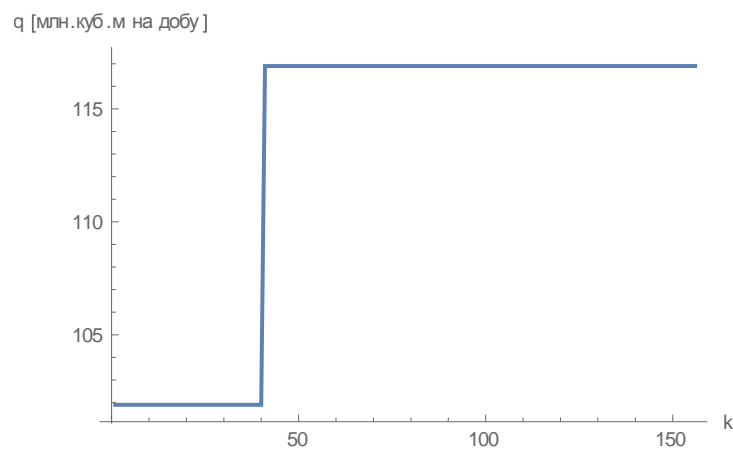


Рисунок 5.6 – Значення витрат газу в 5-й точці розбиття для ММ НН РТГ по ДТ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона та кінетичної енергії

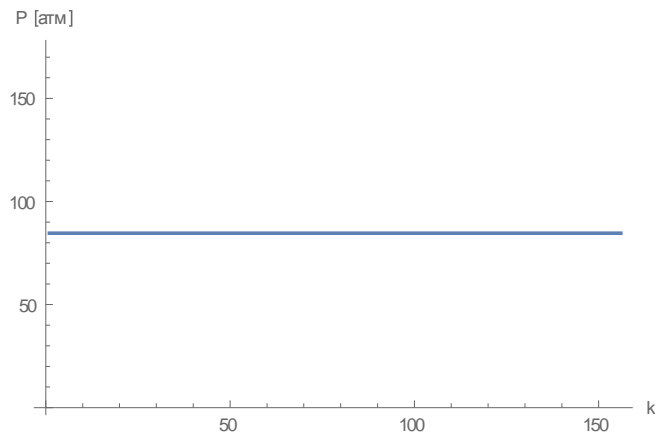


Рисунок 5.7 – Значення тиску в 0-й точці розбиття для ММ НН РТГ по ДТ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона

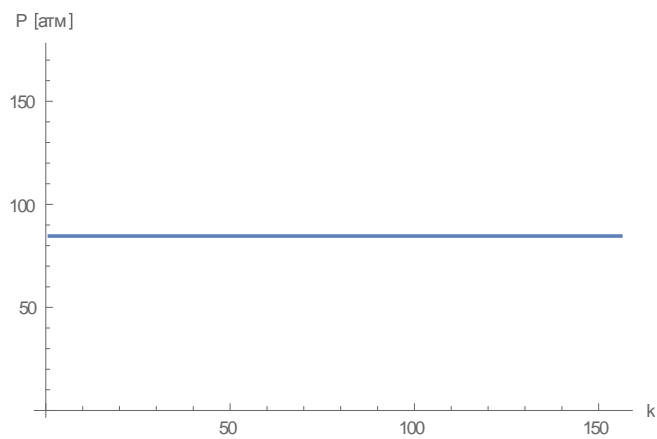


Рисунок 5.8 – Значення тиску в 0-й точці розбиття для ММ НН РТГ по ДТ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона та кінетичної енергії

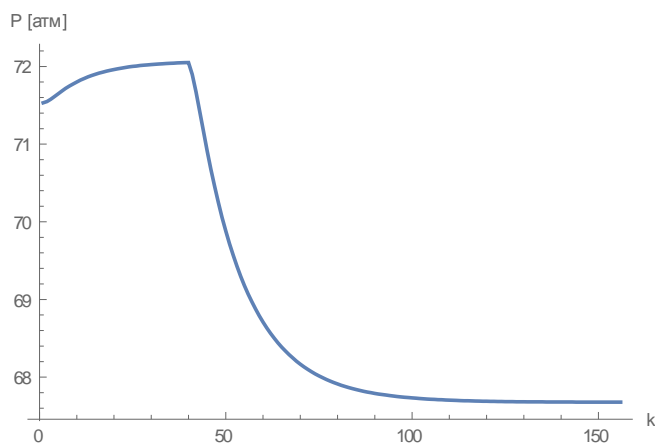


Рисунок 5.9 – Значення тиску в 3-й точці розбиття для ММ НН РТГ по ДТ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона

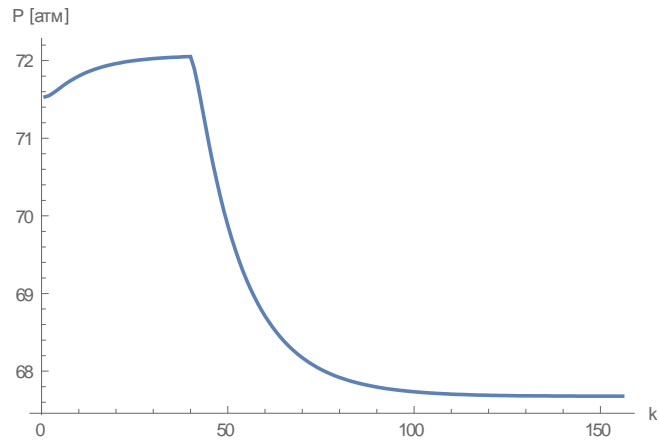


Рисунок 5.10 – Значення тиску в 3-й точці розбиття для ММ НН РТГ по ДТ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона та кінетичної енергії

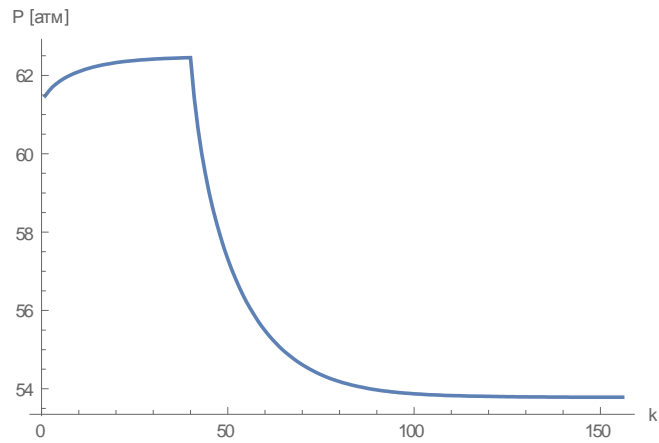


Рисунок 5.11 – Значення тиску в 5-й точці розбиття для ММ НН РТГ по ДТ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона

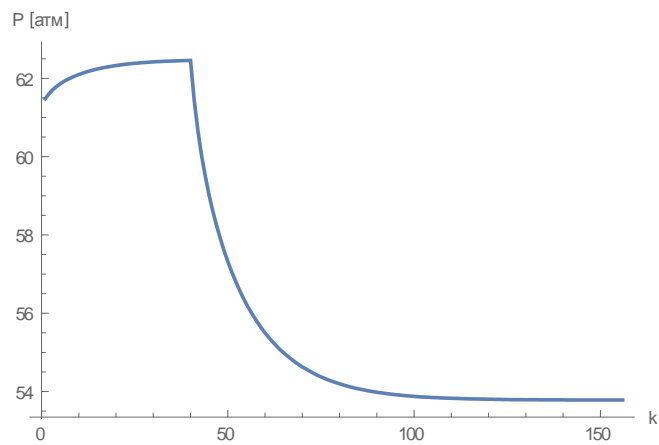


Рисунок 5.12 – Значення тиску в 5-й точці розбиття для ММ НН РТГ по ДТ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона та кінетичної енергії

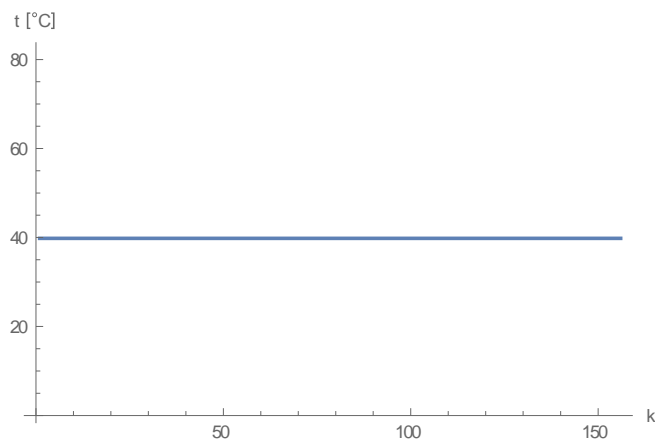


Рисунок 5.13 – Значення температури в 0-й точці розбиття для ММ НН РТГ по ДТ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона

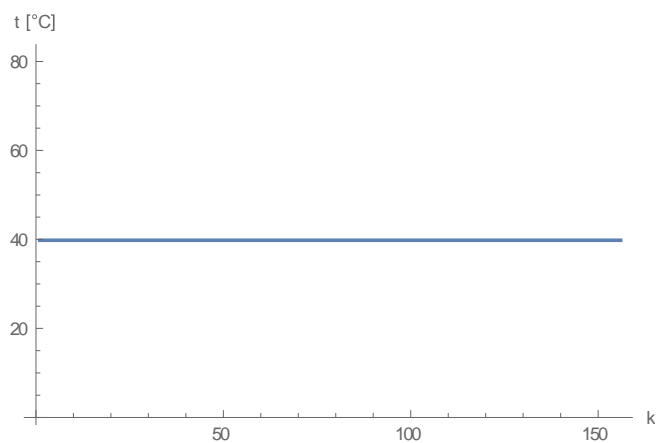


Рисунок 5.14 – Значення температури в 0-й точці розбиття для ММ НН РТГ по ДТ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона та кінетичної енергії

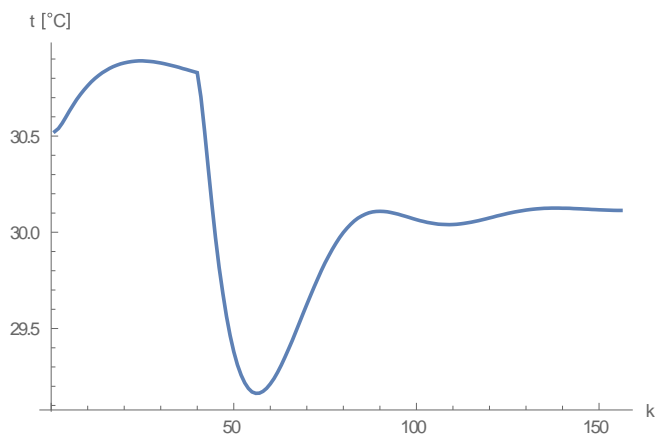


Рисунок 5.15 – Значення температури в 3-й точці розбиття для ММ НН РТГ по ДТ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона

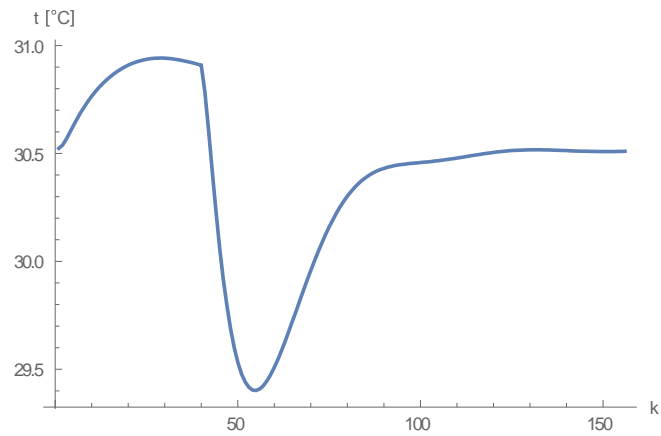


Рисунок 5.16 – Значення температури в 3-й точці розбиття для ММ НН РТГ по ДТ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона та кінетичної енергії

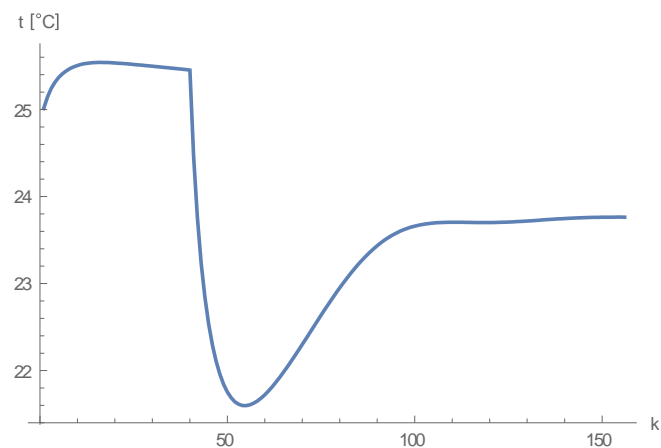


Рисунок 5.17 – Значення температури в 5-й точці розбиття для ММ НН РТГ по ДТ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона

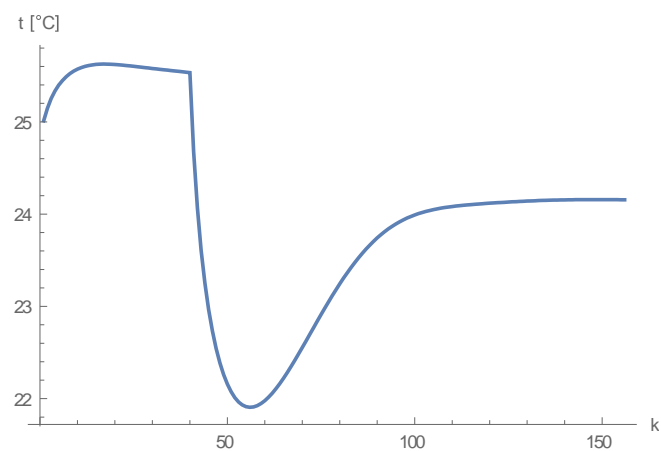


Рисунок 5.18 – Значення температури в 5-й точці розбиття для ММ НН РТГ по ДТ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона та кінетичної енергії

Аналогічно отримаємо результати при $n = 10$, які наведені у таблицях 5.8 – 5.14.

Таблиця 5.8 – Параметри газового потоку на 1-у часовому шарі ($n = 10$)

ММ НН РТГ по ДТ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона				ММ НН РТГ по ДТ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона та кінетичної енергії		
x , км	q , млн.м ³ /доб	P , атм	T , °C	q , млн.м ³ /доб	P , атм	T , °C
0,0	103,644540	84,640000	39,800000	103,644600	84,640000	39,800000
22,4	103,516403	80,467564	36,556826	103,516489	80,467563	36,556196
44,8	103,441133	76,113995	33,470717	103,441233	76,113994	33,470013
67,2	103,332008	71,546060	30,537281	103,332111	71,546060	30,536498
89,6	102,998324	66,727924	27,753363	102,998405	66,727927	27,752579
112,0	101,900000	61,638524	25,162326	101,900000	61,638536	25,162213

Таблиця 5.9 – Параметри газового потоку на 39-у часовому шарі ($n = 10$)

ММ НН РТГ по ДТ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона				ММ НН РТГ по ДТ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона та кінетичної енергії		
x , км	q , млн.м ³ /доб	P , атм	T , °C	q , млн.м ³ /доб	P , атм	T , °C
0,0	101,956241	84,640000	39,800000	101,955944	84,640000	39,800000
22,4	101,954125	80,597007	36,630248	101,953836	80,597056	36,635789
44,8	101,947519	76,384169	33,613240	101,947295	76,384331	33,621416
67,2	101,936195	71,969685	30,744382	101,936048	71,970008	30,751274
89,6	101,920173	67,312082	28,011154	101,920096	67,312611	28,017532
112,0	101,900000	62,355514	25,371545	101,900000	62,356333	25,376575

Таблиця 5.10 – Параметри газового потоку на 40-у часовому шарі ($n = 10$)

ММ НН РТГ по ДТ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона				ММ НН РТГ по ДТ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона та кінетичної енергії		
x , км	q , млн.м ³ /доб	P , атм	T , °C	q , млн.м ³ /доб	P , атм	T , °C
0,0	102,203023	84,640000	39,800000	102,202715	84,640000	39,800000
22,4	102,307528	80,577538	36,615487	102,307220	80,577588	36,621168
44,8	102,738071	76,324746	33,563749	102,737783	76,324898	33,571585
67,2	103,950167	71,806132	30,604649	103,949852	71,806412	30,610662
89,6	107,299400	66,854593	27,613113	107,298946	66,855020	27,618788
112,0	116,900000	61,008832	24,098643	116,900000	61,009700	24,179481

Таблиця 5.11 – Параметри газового потоку на 41-у часовому шарі ($n = 10$)

ММ НН РТГ по ДТ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона				ММ НН РТГ по ДТ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона та кінетичної енергії		
x , км	q , млн.м ³ /доб	P , атм	T , °C	q , млн.м ³ /доб	P , атм	T , °C
0,0	102,767716	84,640000	39,800000	102,767347	84,640000	39,800000
22,4	103,002345	80,532605	36,583387	103,001961	80,532644	36,589036
44,8	103,867744	76,207577	33,471323	103,867316	76,207698	33,478615
67,2	105,842802	71,553342	30,399109	105,842216	71,553552	30,404344
89,6	109,841247	66,356004	27,200708	109,840334	66,356333	27,209331
112,0	116,900000	60,181401	23,412527	116,900000	60,182522	23,519871

Таблиця 5.12 – Параметри газового потоку на 42-у часовому шарі ($n = 10$)

ММ НН РТГ по ДТ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона				ММ НН РТГ по ДТ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона та кінетичної енергії		
x , км	q , млн.м ³ /доб	P , атм	T , °C	q , млн.м ³ /доб	P , атм	T , °C
0,0	103,559862	84,640000	39,800000	103,559378	84,640000	39,800000
22,4	103,886589	80,468814	36,541202	103,886072	80,468838	36,546690
44,8	105,014587	76,057007	33,358521	105,013954	76,057088	33,365200
67,2	107,286721	71,273966	30,182890	107,285793	71,274105	30,187756
89,6	111,177230	65,900828	26,844141	111,175829	65,901093	26,858668
112,0	116,900000	59,564662	22,965280	116,900000	59,566119	23,077248

Таблиця 5.13 – Параметри газового потоку на 98-у часовому шарі ($n = 10$)

ММ НН РТГ по ДТ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона				ММ НН РТГ по ДТ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона та кінетичної енергії		
x , км	q , млн.м ³ /доб	P , атм	T , °C	q , млн.м ³ /доб	P , атм	T , °C
0,0	116,715301	84,640000	39,800000	116,717871	84,640000	39,800000
22,4	116,721818	79,302693	36,460866	116,724315	79,304021	36,453629
44,8	116,742474	73,640808	33,200994	116,745012	73,643768	33,191977
67,2	116,778671	67,570366	29,977321	116,780913	67,575028	29,977953
89,6	116,831151	60,967770	26,753032	116,832586	60,974225	26,764057
112,0	116,900000	53,637141	23,468113	116,900000	53,645669	23,484534

Таблиця 5.14 – Параметри газового потоку на 156-у часовому шарі
($n = 10$)

x , км	ММ НН РТГ по ДТ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона			ММ НН РТГ по ДТ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона та кінетичної енергії		
	q , млн.м ³ /доб	P , атм	T , °С	q , млн.м ³ /доб	P , атм	T , °С
0,0	116,897632	84,640000	39,800000	116,897524	84,640000	39,800000
22,4	116,897720	79,285163	36,454816	116,897616	79,286464	36,457376
44,8	116,898008	73,604803	33,202609	116,897910	73,607547	33,207280
67,2	116,898492	67,515394	30,012664	116,898410	67,519781	30,018878
89,6	116,899162	60,893917	26,843796	116,899108	60,900244	26,850137
112,0	116,900000	53,545076	23,634904	116,900000	53,553836	23,638489

По отриманим вище результатам підрахуємо розбіжність значень параметрів газового потоку між двома ММ (ММ НН РТГ по ДТ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона, ММ НН РТГ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона та кінетичної енергії) по максимуму модуля їх різниці (табл. 5.15).

Загальний час роботи програми для кожної ММ НН РТГ при різній кількості точок розбиття n наведено у таблиці 5.16.

Таблиця 5.16 – Порівняння часу роботи ПП для кожної ММ НН РТГ при різних n

	ММ НН РТГ по ДТ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона		ММ НН РТГ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона та кінетичної енергії	
	$n = 5$	$n = 10$	$n = 5$	$n = 10$
Час роботи ПП	32,858 с	69,825 с	37,326 с	80,544 с

Таблиця 5.15 – Максимуми модулів різниць параметрів газового потоку двох ММ НН РТГ на різних часових шарах

	$n = 5$			$n = 10$		
	q (млн.м ³ /доб)	P (атм)	T (°C)	q (млн.м ³ /доб)	P (атм)	T (°C)
1	0,000132	0,000014	0,004529	0,000107	0,000011	0,000824
39	0,003771	0,003695	0,091860	0,000619	0,000818	0,019089
40	0,004621	0,003375	0,217573	0,002248	0,000868	0,080837
41	0,007989	0,003294	0,309450	0,002991	0,001122	0,107344
42	0,010497	0,003469	0,369764	0,003081	0,001457	0,111968
98	0,011299	0,028057	0,450550	0,002570	0,008528	0,097586
156	0,000210	0,030647	0,397000	0,000160	0,008760	0,092786

Для наочності отриманих результатів по розбіжності значень параметрів газового потоку між двома ММ для $n = 10$ побудуємо графіки максимумів модулів різниць витрати (рис. 5.19), тиску (рис. 5.20) та температури (рис. 5.21) двох ММ НН РТГ.

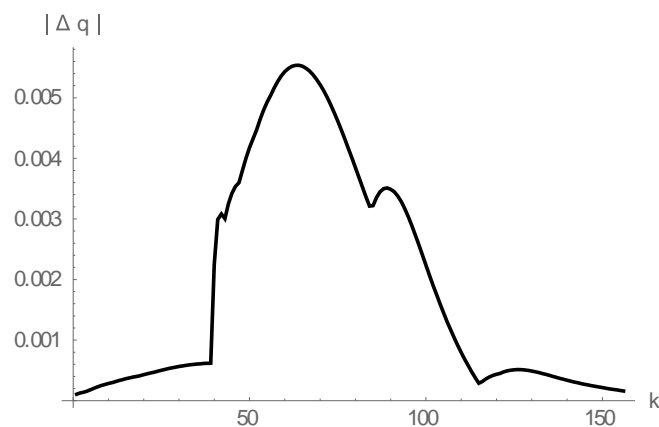


Рисунок 5.19 – Максимуми модулів різниць витрат $q, \frac{\text{млн.м}^3}{\text{доб}}$ двох ММ НН РТГ

Найбільше значення максимумів модулів різниць витрат двох ММ НН РТГ досягнуто на 64 часовому шарі, воно складає 0,005537.

Таблиця 5.17 – Максимуми модулів різниць витрат двох ММ НН РТГ
на різних часових шарах ($n = 10$)

k -й часо- вий шар	q (млн.м ³ /доб)	k -й часо- вий шар	q (млн.м ³ /доб)	k -й часо- вий шар	q (млн.м ³ /доб)
1	0,000107	64	0,005537	115	0,000287
39	0,000619	84	0,003213	118	0,000393
40	0,002248	85	0,003221	126	0,000513
42	0,003081	89	0,003511	132	0,000464
43	0,003003	99	0,002404	156	0,000160

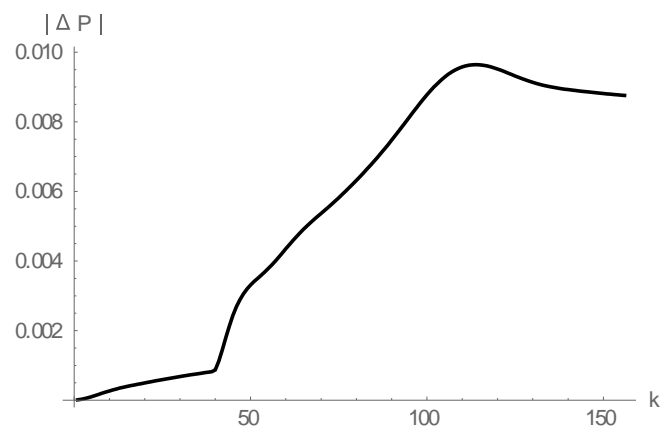


Рисунок 5.20 – Максимуми модулів різниць тиску $P, атм$ двох ММ НН РТГ

Таблиця 5.18 – Максимуми модулів різниць тиску двох ММ НН РТГ
на різних часових шарах ($n = 10$)

k -й часо- вий шар	P (атм)	k -й часо- вий шар	P (атм)
1	0,000011	109	0,009537
39	0,000818	114	0,009641
40	0,000868	126	0,009278
64	0,004807	143	0,008888
83	0,006640	156	0,008760

Найбільше значення максимумів модулів різниць тиску двох ММ НН РТГ

досягнуто на 114 часовому шарі, воно складає 0,009641.

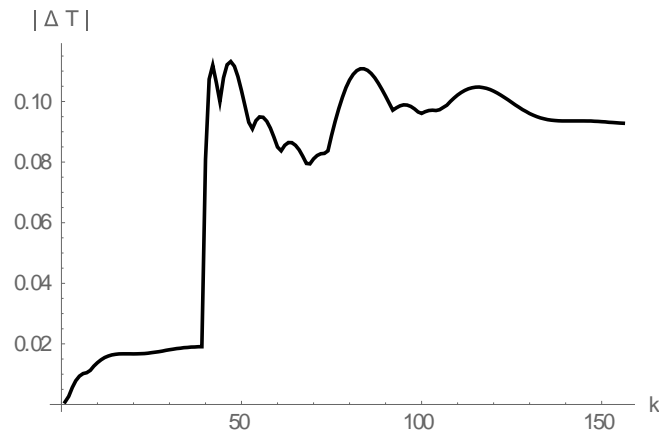


Рисунок 5.21 – Максимуми модулів різниць температури T , °C
двох ММ НН РТГ

Таблиця 5.19 – Максимуми модулів різниць температури двох
ММ НН РТГ на різних часових шарах ($n = 10$)

k -й часо- вий шар	T (°C)	k -й часо- вий шар	T (°C)	k -й часо- вий шар	T (°C)
1	0,000824	47	0,113175	88	0,105999
39	0,019089	48	0,111637	95	0,098874
40	0,080837	69	0,079408	116	0,104739
42	0,111968	76	0,093409	145	0,093584
44	0,099939	84	0,110803	156	0,092786

Найбільше значення максимумів модулів різниць температури двох ММ НН РТГ досягнуто на 47 часовому шарі, воно складає 0,113175.

По отриманим результатам можна зробити висновок, що найбільша різниця в параметрах газового потоку (тиску, витраті, температурі) для двох ММ НН РТГ спостерігається після різкої зміни граничних умов, тобто починаючи з 40-го часового шару, особливо ця різниця помітна за температурою. У середньому максимум модуля різниць по витраті та тиску досягається в третьому

знаку після коми, по температурі – у першому знаку. Порівнюючи час роботи програм бачимо, що програма з ММ НН РТГ по ДТ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона працює швидше ніж програма з ММ НН РТГ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона та кінетичної енергії. По графікам для різних n на рисунках 5.1 – 5.18 та Б.1 – Б.18 (додаток Б), бачимо, що характер поведінки параметрів газового потоку залишається незмінним.

Тепер розрахуємо значення параметрів газового потоку для відключення великих споживачів. Граничні умови на початку та в кінці ділянки:

$$\begin{cases} P(0,t) = 84,64 \text{ атм}, \\ T(0,t) = 39,8^\circ\text{C}, \end{cases} \quad G(L,t) = \begin{cases} 101,9 \frac{\text{млн.м}^3}{\text{доб}}, t < 200 \text{ хв}, \\ 86,9 \frac{\text{млн.м}^3}{\text{доб}}, t \geq 200 \text{ хв}. \end{cases}$$

Якщо кількість точок розбиття дорівнюватиме $n = 5$, то отримаємо наступні параметри газового потоку на обраних часових шарах для двох ММ НН РТГ (табл. 5.20 – 5.26).

Таблиця 5.20 – Параметри газового потоку на 1-у часовому шарі ($n = 5$)

ММ НН РТГ по ДТ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона				ММ НН РТГ по ДТ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона та кінетичної енергії		
x , км	q , млн.м ³ /доб	P , атм	T , °C	q , млн.м ³ /доб	P , атм	T , °C
0,0	104,129835	84,640000	39,800000	104,129874	84,640000	39,800000
22,4	103,479402	80,491745	36,577367	103,479492	80,491742	36,576794
44,8	103,597883	76,118020	33,475424	103,597992	76,118019	33,474670
67,2	103,323849	71,548505	30,538971	103,323947	71,548504	30,538216
89,6	103,270091	66,746884	27,771791	103,270224	66,746889	27,770539
112,0	101,900000	61,606495	25,143162	101,900000	61,606509	25,147692

Таблиця 5.21 – Параметри газового потоку на 39-у часовому шарі ($n = 5$)

ММ НН РТГ по ДТ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона				ММ НН РТГ по ДТ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона та кінетичної енергії		
x , км	q , млн.м ³ /доб	P , атм	T , °C	q , млн.м ³ /доб	P , атм	T , °C
0,0	101,971254	84,640000	39,800000	101,973372	84,640000	39,800000
22,4	101,958038	80,670389	36,696558	101,954266	80,670230	36,740257
44,8	101,960517	76,394385	33,558464	101,962506	76,393817	33,495496
67,2	101,939795	72,050443	30,829428	101,937651	72,051654	30,909344
89,6	101,926296	67,339011	27,990514	101,926817	67,336595	27,898654
112,0	101,900000	62,453510	25,453847	101,900000	62,457205	25,534325

Таблиця 5.22 – Параметри газового потоку на 40-у часовому шарі ($n = 5$)

ММ НН РТГ по ДТ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона				ММ НН РТГ по ДТ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона та кінетичної енергії		
x , км	q , млн.м ³ /доб	P , атм	T , °C	q , млн.м ³ /доб	P , атм	T , °C
0,0	101,702443	84,640000	39,800000	101,704240	84,640000	39,800000
22,4	101,402709	80,692677	36,713773	101,399222	80,692544	36,761031
44,8	101,240379	76,490870	33,638979	101,241710	76,490171	33,574439
67,2	99,382372	72,210734	30,950649	99,381178	72,212090	31,032014
89,6	97,854309	67,925165	28,512239	97,853469	67,922530	28,428339
112,0	86,900000	63,475191	26,425961	86,900000	63,478808	26,425943

Таблиця 5.23 – Параметри газового потоку на 41-у часовому шарі ($n = 5$)

ММ НН РТГ по ДТ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона				ММ НН РТГ по ДТ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона та кінетичної енергії		
x , км	q , млн.м ³ /доб	P , атм	T , °C	q , млн.м ³ /доб	P , атм	T , °C
0,0	101,128502	84,640000	39,800000	101,129773	84,640000	39,800000
22,4	100,528990	80,738708	36,745764	100,525948	80,738616	36,796715
44,8	100,174290	76,637765	33,757214	100,174862	76,636921	33,691473
67,2	97,454247	72,451467	31,132246	97,453609	72,452971	31,214155
89,6	95,091913	68,421439	28,915014	95,090733	68,418653	28,841554
112,0	86,900000	64,240949	27,099839	86,900000	64,244328	27,049613

Таблиця 5.24 – Параметри газового потоку на 42-у часовому шарі ($n = 5$)

ММ НН РТГ по ДТ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона				ММ НН РТГ по ДТ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона та кінетичної енергії		
x , км	q , млн.м ³ /доб	P , атм	T , °C	q , млн.м ³ /доб	P , атм	T , °C
0,0	100,324019	84,640000	39,800000	100,324673	84,640000	39,800000
22,4	99,516811	80,801772	36,786042	99,514247	80,801727	36,840725
44,8	99,016910	76,804969	33,885016	99,016813	76,803981	33,818411
67,2	96,018464	72,720785	31,329878	96,018132	72,722412	31,411378
89,6	93,334764	68,850653	29,234360	93,333594	68,847764	29,172589
112,0	86,900000	64,843427	27,585506	86,900000	64,846533	27,504214

Таблиця 5.25 – Параметри газового потоку на 98-у часовому шарі ($n = 5$)

ММ НН РТГ по ДТ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона				ММ НН РТГ по ДТ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона та кінетичної енергії		
x , км	q , млн.м ³ /доб	P , атм	T , °C	q , млн.м ³ /доб	P , атм	T , °C
0,0	86,937230	84,640000	39,800000	86,938619	84,640000	39,800000
22,4	86,931992	81,755071	36,766501	86,932666	81,754979	36,768229
44,8	86,931437	78,724988	33,644764	86,932979	78,724857	33,666084
67,2	86,921919	75,674161	31,003376	86,922021	75,673420	31,077660
89,6	86,916173	72,454537	28,441120	86,916430	72,452798	28,430870
112,0	86,900000	69,180824	26,406379	86,900000	69,180109	26,453914

Таблиця 5.26 – Параметри газового потоку на 156-у часовому шарі ($n = 5$)

ММ НН РТГ по ДТ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона				ММ НН РТГ по ДТ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона та кінетичної енергії		
x , км	q , млн.м ³ /доб	P , атм	T , °C	q , млн.м ³ /доб	P , атм	T , °C
0,0	86,900197	84,640000	39,800000	86,899497	84,640000	39,800000
22,4	86,900890	81,757507	36,731830	86,900421	81,757553	36,781645
44,8	86,900142	78,730024	33,679458	86,899467	78,729140	33,678228
67,2	86,900976	75,680639	31,037064	86,900390	75,680735	31,074414
89,6	86,900266	72,462402	28,401043	86,899926	72,460841	28,364496
112,0	86,900000	69,191214	26,091197	86,900000	69,192008	26,120365

Для $n = 5$ отримаємо наступні графіки значення витрат газу (рис. 5.22 – 5.27), тиску (рис. 5.28 – 5.33) та температури (рис. 5.34 – 5.39) для двох ММ НН РТГ в 0-й, 3-й і 5-й точці розбиття.

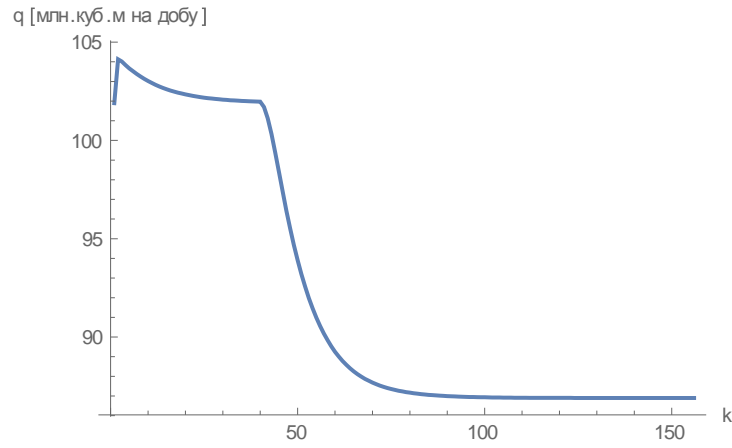


Рисунок 5.22 – Значення витрат газу в 0-й точці розбиття для ММ НН РТГ по ДТ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона

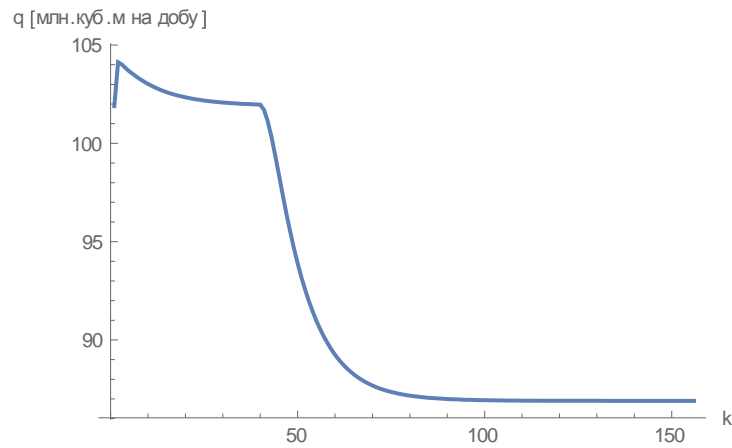


Рисунок 5.23 – Значення витрат газу в 0-й точці розбиття для ММ НН РТГ по ДТ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона та кінетичної енергії

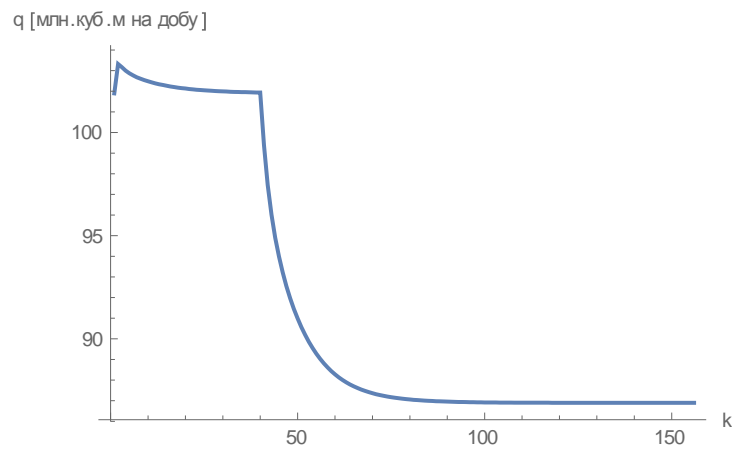


Рисунок 5.24 – Значення витрат газу в 3-й точці розбиття для ММ НН РТГ по ДТ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона

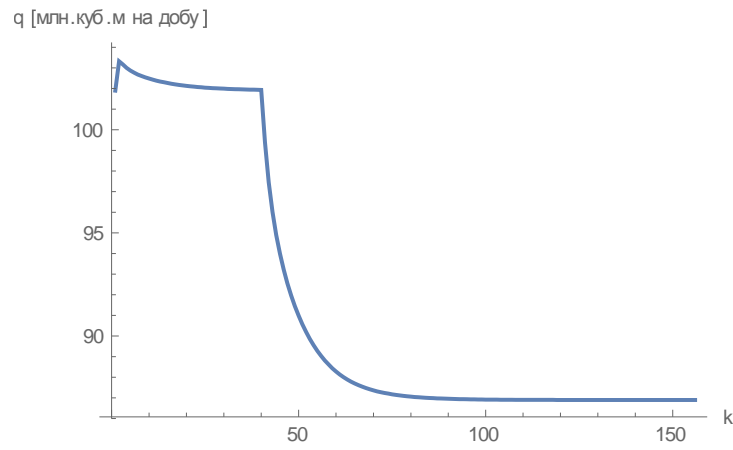


Рисунок 5.25 – Значення витрат газу в 3-й точці розбиття для ММ НН РТГ по ДТ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона та кінетичної енергії

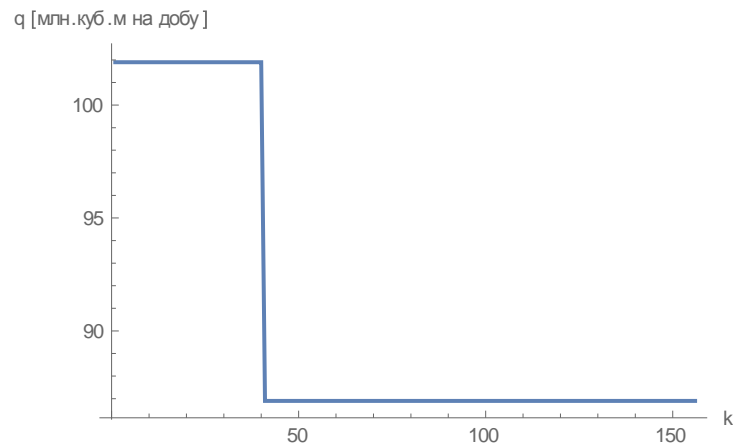


Рисунок 5.26 – Значення витрат газу в 5-й точці розбиття для ММ НН РТГ по ДТ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона

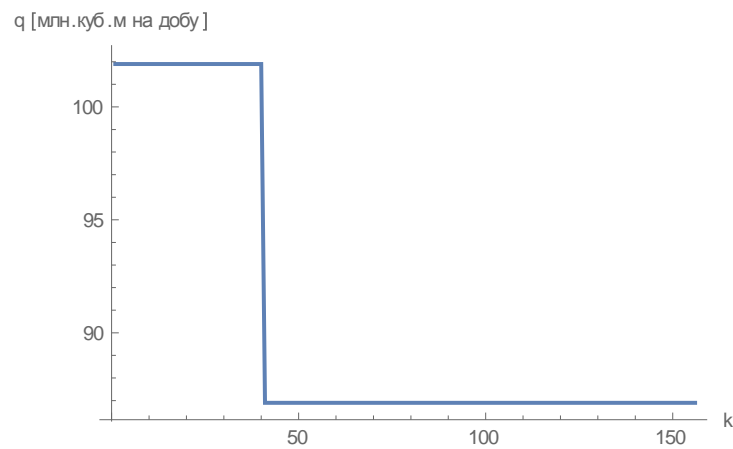


Рисунок 5.27 – Значення витрат газу в 5-й точці розбиття для ММ НН РТГ по ДТ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона та кінетичної енергії

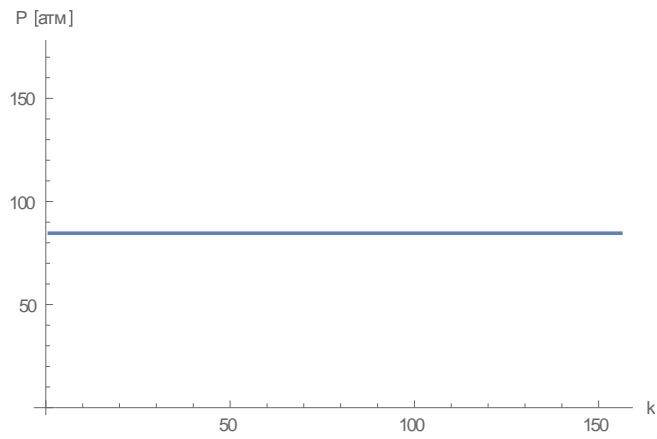


Рисунок 5.28 – Значення тиску в 0-й точці розбиття для ММ НН РТГ по ДТ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона

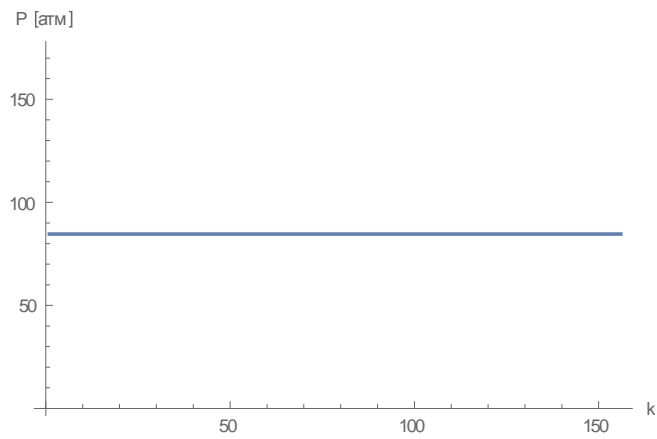


Рисунок 5.29 – Значення тиску в 0-й точці розбиття для ММ НН РТГ по ДТ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона та кінетичної енергії

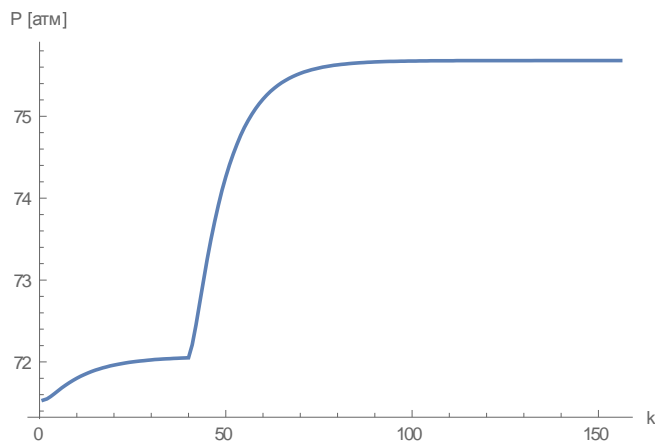


Рисунок 5.30 – Значення тиску в 3-й точці розбиття для ММ НН РТГ по ДТ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона

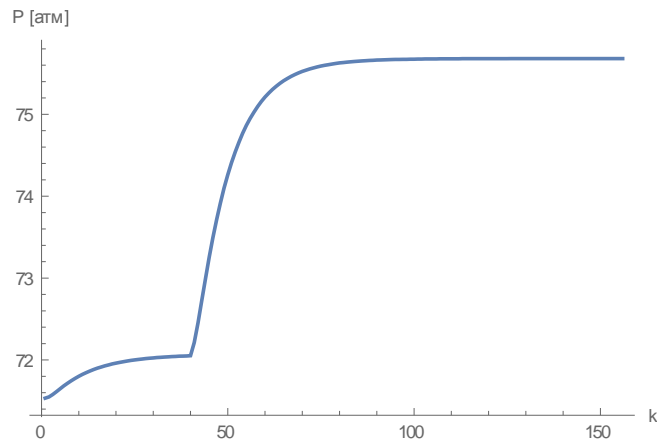


Рисунок 5.31 – Значення тиску в 3-й точці розбиття для ММ НН РТГ по ДТ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона та кінетичної енергії

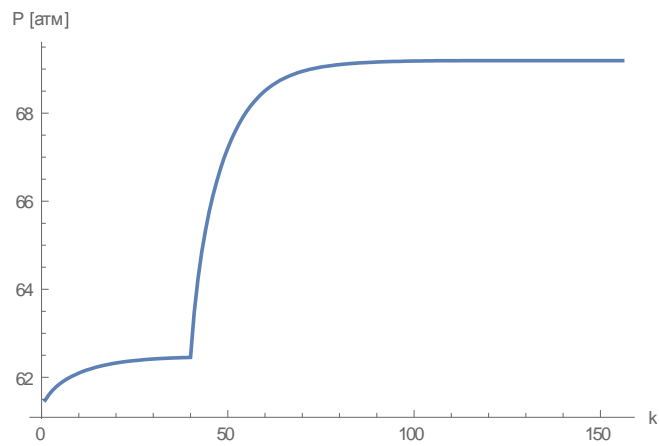


Рисунок 5.32 – Значення тиску в 5-й точці розбиття для ММ НН РТГ по ДТ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона

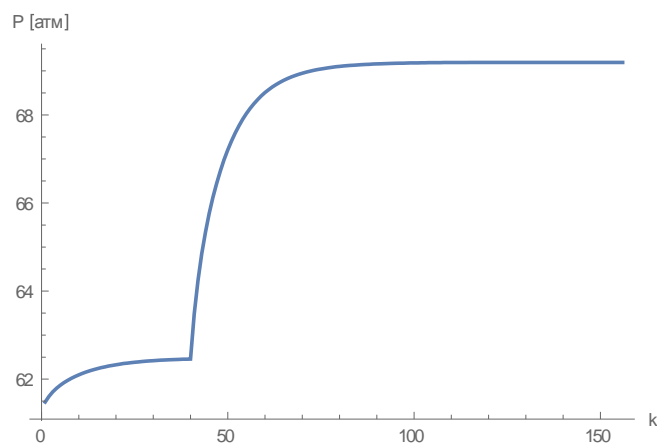


Рисунок 5.33 – Значення тиску в 5-й точці розбиття для ММ НН РТГ по ДТ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона та кінетичної енергії

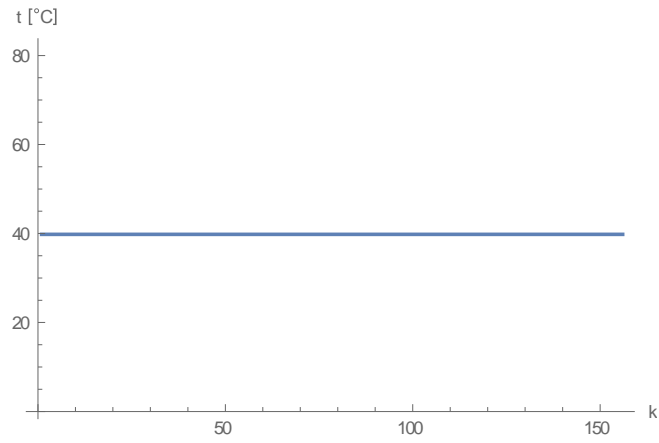


Рисунок 5.34 – Значення температури в 0-й точці розбиття для ММ НН РТГ по ДТ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона

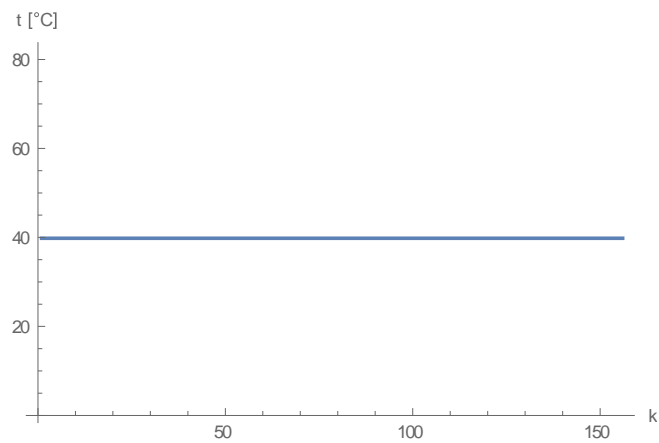


Рисунок 5.35 – Значення температури в 0-й точці розбиття для ММ НН РТГ по ДТ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона та кінетичної енергії

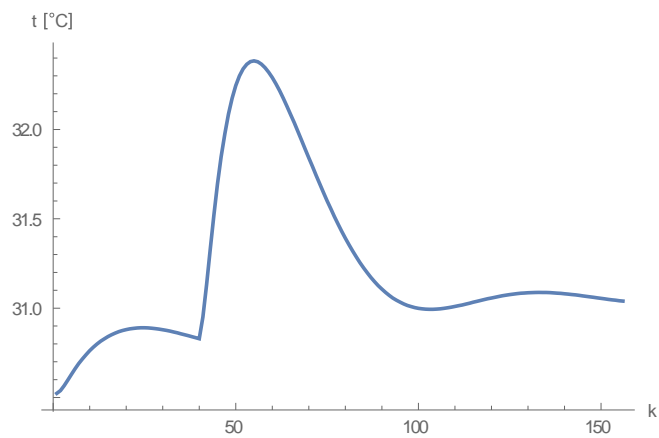


Рисунок 5.36 – Значення температури в 3-й точці розбиття для ММ НН РТГ по ДТ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона

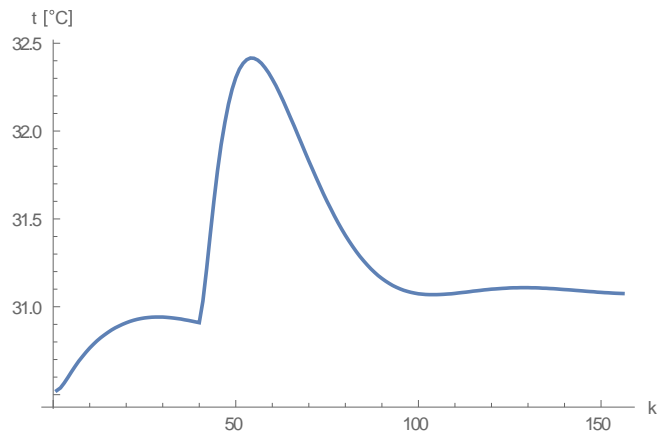


Рисунок 5.37 – Значення температури в 3-й точці розбиття для ММ НН РТГ по ДТ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона та кінетичної енергії

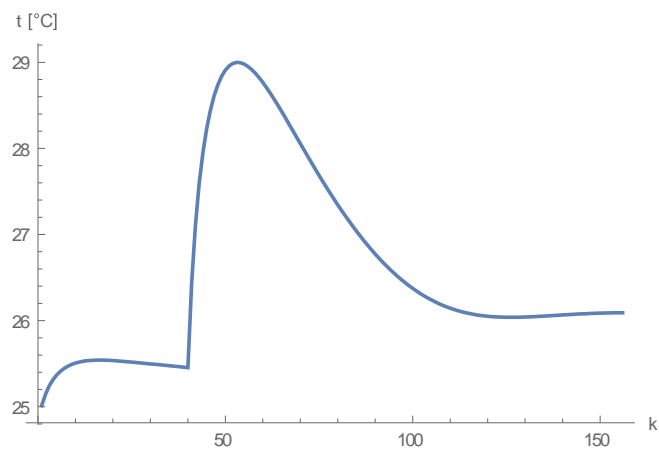


Рисунок 5.38 – Значення температури в 5-й точці розбиття для ММ НН РТГ по ДТ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона

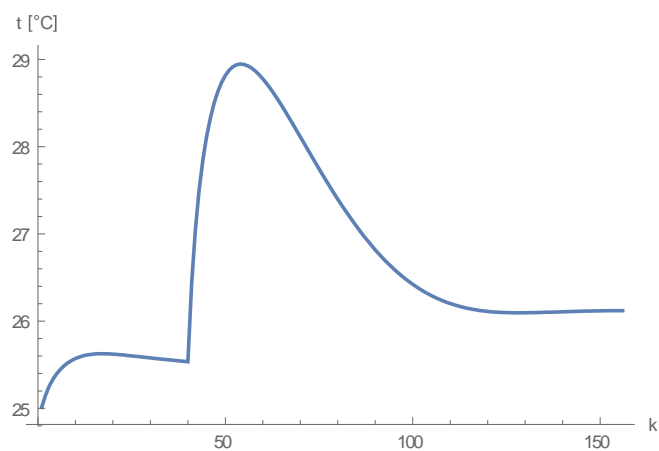


Рисунок 5.39 – Значення температури в 5-й точці розбиття для ММ НН РТГ по ДТ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона та кінетичної енергії

Аналогічно отримаємо результати при $n=10$, які наведені у таблицях 5.27 – 5.33.

Таблиця 5.27 – Параметри газового потоку на 1-у часовому шарі ($n=10$)

ММ НН РТГ по ДТ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона				ММ НН РТГ по ДТ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона та кінетичної енергії		
x , км	q , млн.м ³ /доб	P , атм	T , °C	q , млн.м ³ /доб	P , атм	T , °C
0,0	103,644540	84,640000	39,800000	103,644600	84,640000	39,800000
22,4	103,516403	80,467564	36,556826	103,516489	80,467563	36,556196
44,8	103,441133	76,113995	33,470717	103,441233	76,113994	33,470013
67,2	103,332008	71,546060	30,537281	103,332111	71,546060	30,536498
89,6	102,998324	66,727924	27,753363	102,998405	66,727927	27,752579
112,0	101,900000	61,638524	25,162326	101,900000	61,638536	25,162213

Таблиця 5.28 – Параметри газового потоку на 39-у часовому шарі ($n=10$)

ММ НН РТГ по ДТ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона				ММ НН РТГ по ДТ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона та кінетичної енергії		
x , км	q , млн.м ³ /доб	P , атм	T , °C	q , млн.м ³ /доб	P , атм	T , °C
0,0	101,956241	84,640000	39,800000	101,955944	84,640000	39,800000
22,4	101,954125	80,597007	36,630248	101,953836	80,597056	36,635789
44,8	101,947519	76,384169	33,613240	101,947295	76,384331	33,621416
67,2	101,936195	71,969685	30,744382	101,936048	71,970008	30,751274
89,6	101,920173	67,312082	28,011154	101,920096	67,312611	28,017532
112,0	101,900000	62,355514	25,371545	101,900000	62,356333	25,376575

Таблиця 5.29 – Параметри газового потоку на 40-у часовому шарі ($n = 10$)

ММ НН РТГ по ДТ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона				ММ НН РТГ по ДТ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона та кінетичної енергії		
x , км	q , млн.м ³ /доб	P , атм	T , °C	q , млн.м ³ /доб	P , атм	T , °C
0,0	101,688131	84,640000	39,800000	101,687867	84,640000	39,800000
22,4	101,575059	80,618512	36,646174	101,574805	80,618574	36,652094
44,8	101,113843	76,448704	33,663331	101,113653	76,448888	33,671773
67,2	99,835157	72,143846	30,885386	99,835035	72,144192	30,893043
89,6	96,378613	67,785785	28,414863	96,378535	67,786327	28,422801
112,0	86,900000	63,666234	26,598706	86,900000	63,666887	26,561252

Таблиця 5.30 – Параметри газового потоку на 41-у часовому шарі ($n = 10$)

ММ НН РТГ по ДТ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона				ММ НН РТГ по ДТ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона та кінетичної енергії		
x , км	q , млн.м ³ /доб	P , атм	T , °C	q , млн.м ³ /доб	P , атм	T , °C
0,0	101,072216	84,640000	39,800000	101,071994	84,640000	39,800000
22,4	100,818904	80,667808	36,680987	100,818693	80,667886	36,687345
44,8	99,889747	76,576046	33,760990	99,889592	76,576256	33,769794
67,2	97,796710	72,413284	31,099006	97,796602	72,413653	31,107401
89,6	93,685741	68,294649	28,829552	93,685658	68,295193	28,836979
112,0	86,900000	64,435632	27,237309	86,900000	64,436156	27,185021

Таблиця 5.31 – Параметри газового потоку на 42-у часовому шарі ($n = 10$)

ММ НН РТГ по ДТ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона				ММ НН РТГ по ДТ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона та кінетичної енергії		
x , км	q , млн.м ³ /доб	P , атм	T , °C	q , млн.м ³ /доб	P , атм	T , °C
0,0	100,191883	84,640000	39,800000	100,191710	84,640000	39,800000
22,4	99,837308	80,737857	36,727027	99,837142	80,737952	36,733822
44,8	98,623724	76,739226	33,881429	98,623604	76,739459	33,890568
67,2	96,226817	72,707520	31,323109	96,226731	72,707906	31,332012
89,6	92,288469	68,747786	29,178166	92,288404	68,748325	29,183694
112,0	86,900000	64,997905	27,651907	86,900000	64,998324	27,595803

Таблиця 5.32 – Параметри газового потоку на 98-у часовому шарі ($n = 10$)

ММ НН РТГ по ДТ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона				ММ НН РТГ по ДТ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона та кінетичної енергії		
x , км	q , млн.м ³ /доб	P , атм	T , °C	q , млн.м ³ /доб	P , атм	T , °C
0,0	86,932463	84,640000	39,800000	86,931576	84,640000	39,800000
22,4	86,931256	81,720784	36,635786	86,930363	81,720611	36,638409
44,8	86,927313	78,723481	33,704726	86,926582	78,723310	33,707629
67,2	86,920760	75,636898	30,982542	86,920263	75,636815	30,977850
89,6	86,911876	72,447779	28,475300	86,911624	72,447810	28,471506
112,0	86,900000	69,139231	26,259638	86,900000	69,139398	26,256268

Таблиця 5.33 – Параметри газового потоку на 156-у часовому шарі
($n = 10$)

ММ НН РТГ по ДТ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона				ММ НН РТГ по ДТ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона та кінетичної енергії		
x , км	q , млн.м ³ /доб	P , атм	T , °С	q , млн.м ³ /доб	P , атм	T , °С
0,0	86,900215	84,640000	39,800000	86,900342	84,640000	39,800000
22,4	86,900213	81,722843	36,635773	86,900337	81,722889	36,636026
44,8	86,900181	78,727772	33,693232	86,900288	78,727862	33,693132
67,2	86,900106	75,643375	30,952287	86,900206	75,643532	30,950909
89,6	86,900035	72,456263	28,387178	86,900110	72,456489	28,387798
112,0	86,900000	69,150353	25,979123	86,900000	69,150627	25,982842

По отриманим вище результатам підрахуємо розбіжність значень параметрів газового потоку між двома ММ (ММ НН РТГ по ДТ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона, ММ НН РТГ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона та кінетичної енергії) по максимуму модуля їх різниці (табл. 5.34).

Загальний час роботи програми для кожної ММ НН РТГ при різній кількості точок розбиття n наведено у таблиці 5.35.

Таблиця 5.35 – Порівняння часу роботи ПП для кожної ММ НН РТГ при різних n

	ММ НН РТГ по ДТ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона		ММ НН РТГ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона та кінетичної енергії	
	$n = 5$	$n = 10$	$n = 5$	$n = 10$
Час роботи ПП	36,546 с	80,534 с	41,892 с	92,078 с

Таблиця 5.34 – Максимуми модулів різниць параметрів газового потоку двох ММ НН РТГ на різних часових шарах

	$n = 5$			$n = 10$		
	q (млн.м ³ /доб)	P (атм)	T (°C)	q (млн.м ³ /доб)	P (атм)	T (°C)
1	0,000132	0,000014	0,004529	0,000107	0,000011	0,000824
39	0,003771	0,003695	0,091860	0,000619	0,000818	0,019089
40	0,003486	0,003617	0,083900	0,000562	0,000653	0,037454
41	0,003041	0,003378	0,081908	0,000447	0,000543	0,052288
42	0,002564	0,003106	0,081500	0,000307	0,000539	0,056104
98	0,001542	0,001738	0,074284	0,000893	0,000216	0,018835
156	0,000699	0,001561	0,049815	0,000126	0,000275	0,007401

Для наочності отриманих результатів по розбіжності значень параметрів газового потоку між двома ММ для $n = 10$ побудуємо графіки максимумів модулів різниць витрати (рис. 5.40), тиску (рис. 5.41) та температури (рис. 5.42) двох ММ НН РТГ.

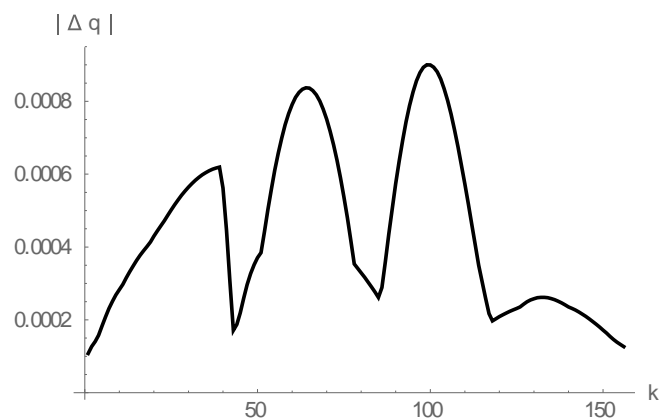


Рисунок 5.40 – Максимуми модулів різниць витрат $q, \frac{\text{млн.м}^3}{\text{доб}}$ двох ММ НН РТГ

Найбільше значення максимумів модулів різниць витрат двох ММ НН РТГ досягнуто на 99 часовому шарі, воно складає 0,000900.

Таблиця 5.36 – Максимуми модулів різниць витрат двох ММ НН РТГ
на різних часових шарах ($n = 10$)

k -й часо- вий шар	q (млн.м ³ /доб)	k -й часо- вий шар	q (млн.м ³ /доб)	k -й часо- вий шар	q (млн.м ³ /доб)
1	0,000107	64	0,000837	115	0,000305
39	0,000619	84	0,000276	118	0,000197
40	0,000562	85	0,000261	126	0,000235
42	0,000307	89	0,000506	132	0,000262
43	0,000171	99	0,000900	156	0,000126

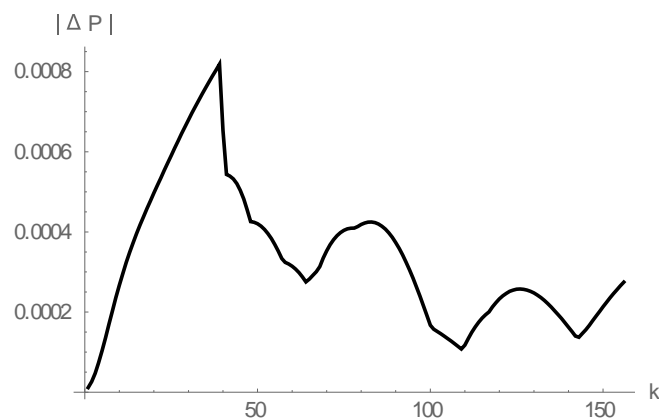


Рисунок 5.41 – Максимуми модулів різниць тиску P , атм двох ММ НН РТГ

Таблиця 5.37 – Максимуми модулів різниць тиску двох ММ НН РТГ
на різних часових шарах ($n = 10$)

k -й часо- вий шар	P (атм)	k -й часо- вий шар	P (атм)
1	0,000011	109	0,000107
39	0,000818	114	0,000175
40	0,000653	126	0,000257
64	0,000275	143	0,000137
83	0,000425	156	0,000275

Найбільше значення максимумів модулів різниць тиску двох ММ НН РТГ

досягнуто на 39 часовому шарі, воно складає 0,000818.

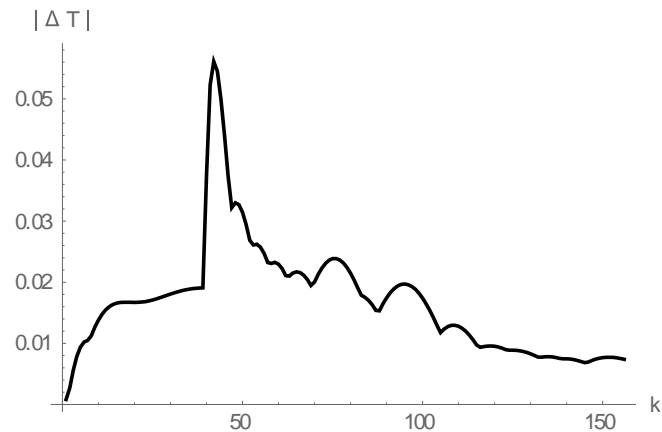


Рисунок 5.42 – Максимуми модулів різниць температури T , °C
двох ММ НН РТГ

Таблиця 5.38 – Максимуми модулів різниць температури двох
ММ НН РТГ на різних часових шарах ($n = 10$)

k -й часо- вий шар	T (°C)	k -й часо- вий шар	T (°C)	k -й часо- вий шар	T (°C)
1	0,000824	47	0,032195	88	0,015325
39	0,019089	48	0,032998	95	0,019714
40	0,037454	69	0,019476	116	0,009345
42	0,056104	76	0,023879	145	0,006843
44	0,050012	84	0,017539	156	0,007401

Найбільше значення максимумів модулів різниць температури двох ММ НН РТГ досягнуто на 42 часовому шарі, воно складає 0,056104.

По отриманим результатам можна зробити висновок, що найбільша різниця в параметрах газового потоку (тиску, витраті, температурі) для двох ММ НН РТГ спостерігається після різкої зміни граничних умов, тобто починаючи з 40-го часового шару, особливо ця різниця помітна за температурою. У середньому максимум модуля різниць по витраті та тиску досягається в четвертому

знаку після коми, по температурі – у другому знаку. Порівнюючи час роботи програм бачимо, що програма з ММ НН РТГ по ДТ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона працює швидше ніж програма з ММ НН РТГ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона та кінетичної енергії. По графікам для різних n на рисунках 5.22 – 5.39 та Б.19 – Б.36 (додаток Б), бачимо, що характер поведінки параметрів газового потоку залишається незмінним.

Для задач підключенні та відключенні великих споживачів наведемо графіки максимумів модулів різниць параметрів газового потоку двох ММ НН РТГ з 1-го по 45-й часовий шар (рис. 5.43 – 5.48).

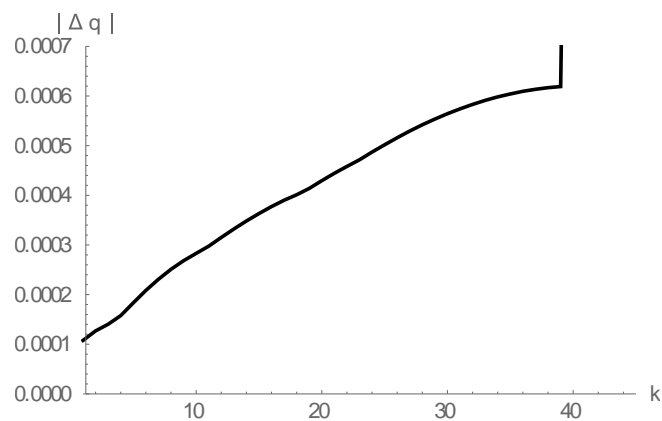


Рисунок 5.43 – Максимуми модулів різниць витрат $q, \text{млн.м}^3 / \text{доб}$ двох ММ НН РТГ з 1-го по 45-й часовий шар (підключення великого споживача)

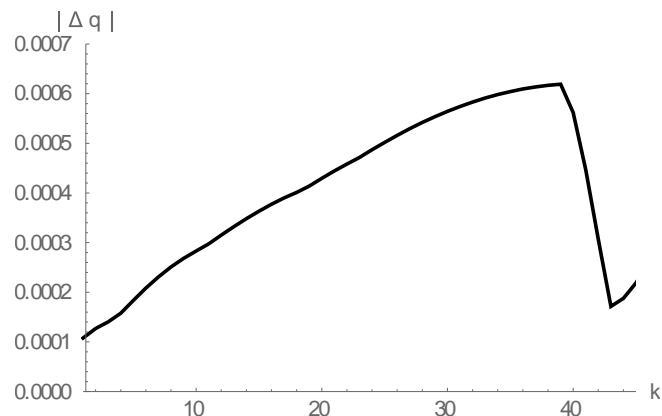


Рисунок 5.44 – Максимуми модулів різниць витрат $q, \text{млн.м}^3 / \text{доб}$ двох ММ НН РТГ з 1-го по 45-й часовий шар (відключення великого споживача)

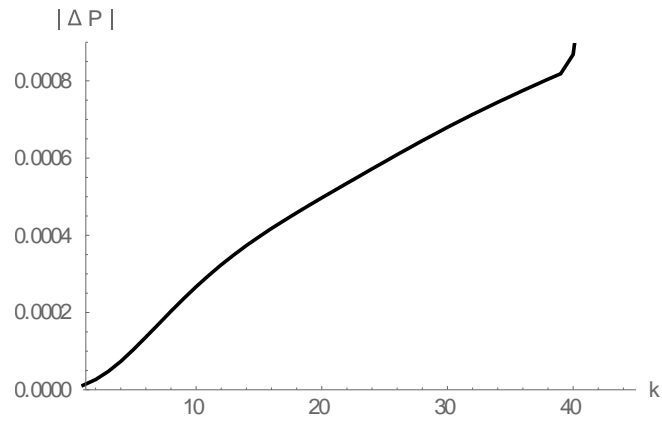


Рисунок 5.45 – Максимуми модулів різниць тиску $P, атм$ двох ММ НН РТГ з 1-го по 45-й часовий шар (підключення великого споживача)

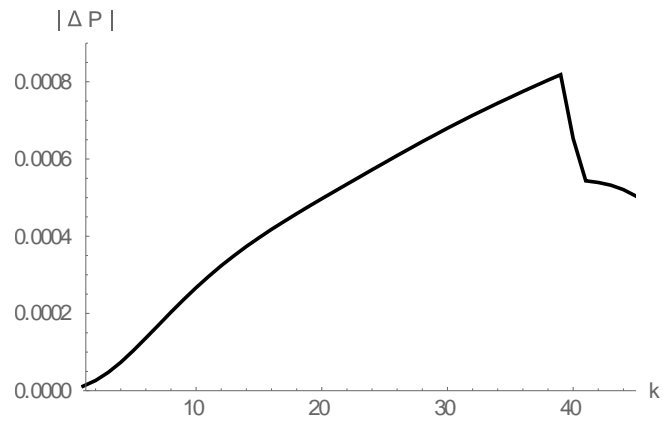


Рисунок 5.46 – Максимуми модулів різниць тиску $P, атм$ двох ММ НН РТГ з 1-го по 45-й часовий шар (відключення великого споживача)

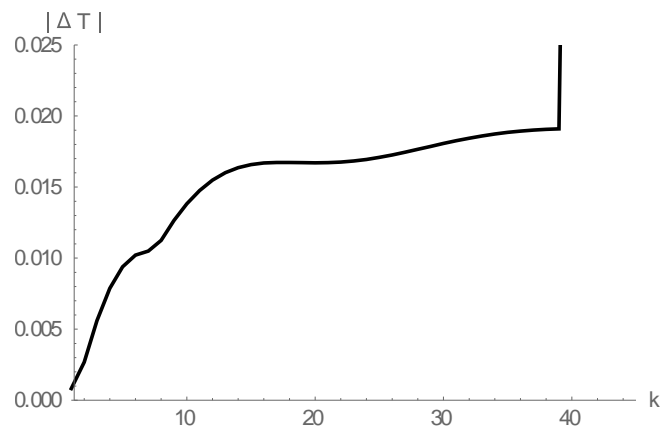


Рисунок 5.47 – Максимуми модулів різниць температури $T, ^\circ C$ двох ММ НН РТГ з 1-го по 45-й часовий шар (підключення великого споживача)

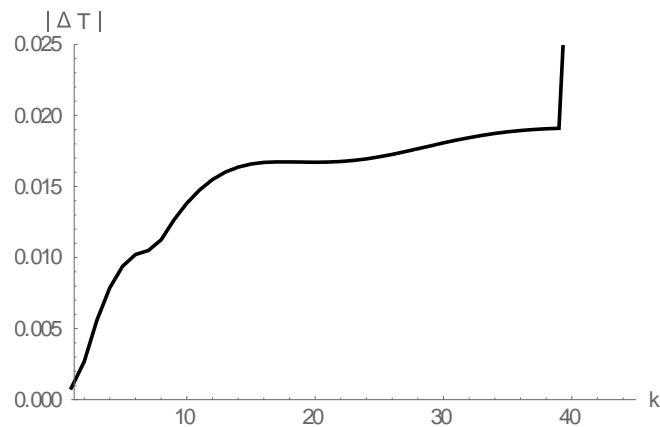


Рисунок 5.48 – Максимуми модулів різниць температури T , $^{\circ}C$ двох ММ НН РТГ з 1-го по 45-й часовий шар (відключення великого споживача)

Побудуємо таблицю найбільших значень максимумів модулів різниць параметрів газового потоку двох ММ НН РТГ при підключенні та відключенні великих споживачів (табл. 5.39).

Таблиця 5.39 – Найбільші значення максимумів модулів різниць параметрів газового потоку двох ММ НН РТГ

	q , млн.м ³ /доб	P , атм	T , $^{\circ}C$
Підключення великих споживачів	0,005537	0,009641	0,113175
Відключення великих споживачів	0,000900	0,000818	0,056104

Порівняльний аналіз результатів отриманих у цьому розділі показав:

– при підключенні та відключенні великих споживачів характер поведінки максимумів модулів різниць параметрів газового потоку двох ММ НН РТГ різний;

– зі збільшенням масової витрати, збільшується значення максимумів модулів різниць параметрів газового потоку двох ММ НН РТГ;

– найбільша різниця в параметрах газового потоку (тиску, витраті, температурі) для двох ММ НН РТГ спостерігається після різкої зміни граничних умов, тобто починаючи з 40-го часового шару;

– час роботи програми з ММ НН РТГ по ДТ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона менше ніж програми з ММ НН РТГ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона та кінетичної енергії;

– розбіжність в параметрах газового потоку (тиску, витраті, температурі) для двох ММ НН РТГ зменшується зі збільшенням точок розбиття;

– характер поведінки параметрів газового потоку, який був наведений на рисунках 5.1 – 5.18, 5.22 – 5.39 та Б.1 – Б.36 (додаток Б) для двох ММ НН РТГ, не змінюється.

При підключенні та відключенні великих споживачів максимуми модулів різниць параметрів газового потоку двох ММ НН РТГ досягаються по різному. При підключенні: максимум модуля різниць по витраті та тиску досягається в третьому знаку після коми, по температурі – у першому знаку. При відключенні: максимум модуля різниць по витраті та тиску досягається в четвертому знаку після коми, по температурі – у другому знаку.

Говорячи про доцільність використання кінетичної енергії при математичному моделюванні НН РТГ, пов'язаних з підключенням та відключенням великих споживачів, можна зробити висновок, що при великих витратах газу, що надходить на ділянку, при підключенні великих споживачів можна враховувати кінетичну енергію, оскільки простежується помітний вплив кінетичної енергії на чисельні результати. В загальному випадку, використання кінетичної енергії залежить від необхідної точності розрахунків, тобто є сенс використовувати кінетичну енергію, якщо параметри газового потоку (витрату та тиск) необхідно враховувати з точністю більшою, ніж 10^{-2} , а температуру – більшою, ніж 10^{-1} .

ВИСНОВКИ

В результаті виконання кваліфікаційної роботи проведено огляд існуючих ММ РР ГТС та обрані дві ММ (ММ НН РТГ по ДТ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона, ММ НН РТГ з урахуванням ефекту Джоуля-Томсона та кінетичної енергії), розв'язані задачі підключення та відключення великих споживачів та отримані нові експериментальні результати на базі двох обраних ММ НН РТГ по ДТ.

Розв'язання систем рівнянь ММ з відомими початковим і граничними умовами здійснено методом скінченних різниць з використанням РСРС, а розв'язання системи нелінійних рівнянь – методом Ньютона.

В ході дослідження створено ПП, який був протестований на обраних ММ з різними вхідними даними.

Отримані результати обчислень, за якими з'ясовано як змінюється характер поведінки параметрів газового потоку при врахуванні кінетичної енергії або нехтуючи нею. Наведено час роботи програмного продукту для кожної ММ при використанні різної кількості точок розбиття ДТ. Наведено порівняльний аналіз результатів обчислень для кожного параметру газового потоку на базі двох обраних ММ НН РТГ та виявлені найбільші максимуми модулів різниць для кожного параметру. Тобто можемо сказати, що мета роботи досягнута, бо виявлені випадки коли доцільно використовувати ММ НН РТГ по ДТ великого діаметру з урахуванням кінетичної енергії.

Результати кваліфікаційної роботи можна вважати корисними для подальшого використання кінетичної енергії у ММ НН РТГ по ДТ великого діаметру, розробки нових способів збільшення надійності ГТС, запобігання аварійних ситуацій при ефективному управлінні РТГ та моделювання більш складних систем.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Гусарова І. Г., Смоковський Р. С. Комп'ютерне моделювання нестационарних режимів по ділянці трубопроводу великого діаметру з урахуванням кінетичної енергії // Міжнародна науково-практична конференція «Інформаційні технології та системи» : тези доповідей (м. Харків, 8-9 квітня 2021 р.). Харків : ХНЕУ імені Семена Кузнеця, 2021. С. 15.
2. Гусарова І. Г., Смоковський Р. С. Чисельне моделювання нестационарних режимів по ділянці трубопроводу великого діаметру // Матеріали II Міжнародної наукової конференції «Здобутки та досягнення прикладних та фундаментальних наук XXI століття». Вінниця : Європейська наукова платформа, 2021. Т. 2. С. 51–52.
3. Селезнев В. Е., Алешин В. В., Прялов С. Н. Основы численного моделирования магистральных трубопроводов. Москва : МАКС Пресс, 2009. 436 с.
4. Лурье М. В. Математическое моделирование процессов трубопроводного транспорта нефти, нефтепродуктов и газа : учеб. пособие. Москва : ФГУП изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина, 2003. 336 с.
5. Сарданашвили С. А. Расчетные методы и алгоритмы (трубопроводный транспорт газа). Москва : ФГУП изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина, 2005. 577 с.
6. Сухарев М. Г., Ставровский Е. Р. Оптимизация систем транспорта газа. Москва : Недра, 1975. 276 с.
7. Неизотермическое течение газа в трубах / О. Ф. Васильев, Э. А. Бондарев, А. Ф. Воеводин, М. А. Каниболотский. Новосибирск : Наука, 1978. 126 с.
8. Adolfo D., Carcasci C. Unsteady Simulation of Natural Gas Networks // AIP Conference Proceedings. 2019. Vol. 2191, № 1. P. 33–41.
9. Тевяшев А. Д., Гусарова И. Г., Буданцева Ю. В. Учет эффекта Джоуля-Томсона в тепловых расчетах для участка магистрального газопровода // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2006. 2/3 (20). С. 57–61.
10. Гусарова И. Г. Метод анализа существенно нестационарных неизо-

термических режимов транспорта газа по системе магистральных газопроводов : дис. канд. техн. наук : 05.13.01 / Гусарова Ирина Григорьевна. Харьков, 1991. 188 с.

11. Смоковський Р. С. Моделювання нестационарних режимів по ділянці трубопроводу великого діаметру з урахуванням кінетичної енергії // XXIV Міжнародний молодіжний форум «Радіоелектроніка та молодь у XXI столітті» : зб. матеріалів форуму (м. Харків, 7-9 квітня 2020 р.). Т. 7/9/10. Харків : ХНУРЕ, 2020. С. 101–102.

12. Гусарова И. Г., Мелиневский Д. В. Численное моделирование режимов течения газа методом конечных разностей // Системи обробки інформації. 2016. № 4 (141). С. 23–27.

13. Система комп'ютерної алгебри. URL : https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B5%D0%BC%D0%B0_%D0%BA%D0%BE%D0%BC%D0%BF%27%D1%8E%D1%82%D0%B5%D1%80%D0%BD%D0%BE%D1%97_%D0%B0%D0%BB%D0%B3%D0%B5%D0%B1%D1%80%D0%B8 (дата звернення: 29.11.2021).