

**Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки**

**КАМІНСЬКА АННА ВОЛОДИМИРІВНА**

**УДК 519.6:621.6:004.942**

**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ЧИСЕЛЬНИЙ АНАЛІЗ  
НЕСТАЦІОНАРНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ БАГАТОНИТКОВИХ ЛІНІЙНИХ  
ДІЛЯНОК ГАЗОТРАНСПОРТНОЇ СИСТЕМИ**

**01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи**

**Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук**

**Харків – 2013**

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Харківському національному університеті радіоелектроніки, Міністерство освіти і науки України.

Науковий керівник – кандидат технічних наук, доцент  
**Гусарова Ірина Григоріївна**, Харківський національний університет радіоелектроніки, професор кафедри прикладної математики.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
**Власенко Лариса Андріївна**, Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна, професор кафедри математичного моделювання та програмного забезпечення;

доктор технічних наук, доцент  
**Ляшенко Віктор Павлович**, Кременчуцький національний університет ім. Михайла Остроградського, завідувач кафедри інформатики і вищої математики.

Захист відбудеться «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2013 р. о \_\_\_\_\_ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.052.02 у Харківському національному університеті радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, пр. Леніна, 14.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Харківського національного університету радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, пр. Леніна, 14.

Автореферат розісланий «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2013 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

Безкорвайний В. В.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Забезпечення надійної та ефективної роботи газотранспортної системи (ГТС) України та її ділянок потребує створення такої автоматизованої системи диспетчерського керування, яка містить постійний якісний та кількісний моніторинг усіх параметрів транспортування газу. Такі системи повинні ґрунтуватися на математичних моделях реальних процесів течії газу по розгалужених, територіально розподілених багатониткових лінійних ділянках ГТС. До основних властивостей цих процесів відносять безперервність та інерційність течії газу, нерівномірність газоспоживання та аварійні ситуації, що робить ці режими течії нестационарними.

На сьогодні існує цілий ряд математичних моделей нестационарних процесів течії газу та методів їх аналізу. Більшість моделей базується на основних законах газової динаміки з тими чи іншими припущеннями. Однак деякі з цих моделей описують тільки рух газу ділянкою трубопроводу і не придатні для розрахунку розгалужених складних багатониткових ділянок ГТС і процесів у них. Моделі, що використовуються для вирішення конкретних інженерних завдань є істотно спрощеними, бо розглядають тільки стаціонарні або ізотермічні процеси. В певних моделях не враховуються деякі складові фізичних процесів в основних рівняннях газової динаміки. У випадках, коли метод аналізу представленої математичної моделі описаний не досить повно, його важко реалізувати на практиці. Тобто більша частина традиційних автоматизованих систем керування ГТС застосовує математичні моделі, засновані на істотних спрощеннях і припущеннях. Це призводить до отримання параметрів газового потоку з великими похибками і до неточного опису процесів течії газу.

Фундаментальні основи газової динаміки було покладено С. О. Чаплигінін, М. Є. Жуковським, Л. С. Лейбензоном, С. О. Христиановичем, К. П. Станюковичем, Л. І. Седовим, Г. Г. Чорним, Л. Прандтлем, І. А. Чарним та ін. Значний вклад у розвиток математичного моделювання і чисельного аналізу нестационарних процесів течії газу внесли такі вчені, як: А. Д. Тевяшев, І. Г. Гусарова, В. Є. Селезньов, В. В. Альошин, С. М. Прялов, С. А. Сарданашвілі, М. В. Лур'є, М. Г. Сухарєв, J. Kralik, P. Stiegler та ін.

Отже, актуальною задачею є створення удосконаленої математичної моделі і чисельних методів розрахунку нестационарних режимів роботи багатониткових лінійних ділянок ГТС, які враховували б складність об'єкта моделювання, важливі фізичні особливості процесу течії газу, можливість виявлення аварійних ситуацій, пов'язаних з витоками газу.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана у відповідності з планом науково-дослідних робіт Харківського національного університету радіоелектроніки в рамках держбюджетних тем: № 236-5 «Розробка та впровадження математичних моделей, методів та інструментальних засобів багатокритеріальної оптимізації режимів функціонування систем енергетики в умовах невизначеності» (ДР № 0109U002571) і № 254-5 «Розробка моделей, методів та інструментальних засобів структурної і параметричної оптимізації

інженерних мереж з витоками» (ДР № 0111О002624), в яких здобувачка брала участь як виконавець. Авторка була розробником удосконаленої математичної моделі та чисельних методів розрахунку нестационарних неізотермічних режимів роботи багатониткових лінійних ділянок ГТС.

**Мета і задачі дослідження.** Метою дисертаційної роботи є удосконалення існуючої математичної моделі нестационарних, зокрема й позаштатних, режимів роботи багатониткових лінійних ділянок ГТС і розробка ефективних чисельних методів розрахунку таких режимів з необхідною точністю.

Досягнення цієї мети передбачає виконання низки задач, насамперед таких:

- аналіз існуючих математичних моделей і удосконалення математичної моделі нестационарних неізотермічних режимів роботи багатониткових лінійних ділянок ГТС, з урахуванням процесу течії газу через комутуючі елементи – запірну арматуру, що дозволить моделювати штатні і аварійні ситуації: відключення-підключення великих споживачів, відкриття-закриття запірної арматури, розриви ділянок трубопроводу і виникнення витоків газу на багатониткових лінійних ділянках ГТС;

- розробка ефективного чисельного методу розрахунку режимів роботи багатониткових лінійних ділянок ГТС для отримання параметрів газового потоку з необхідною точністю;

- розробка методу ідентифікації аварійних ситуацій при витоках газу з багатониткових лінійних ділянок ГТС для зниження шкоди від аварій шляхом оперативного їх виявлення;

- розробка методу оцінювання параметрів витоків газу в аварійних ситуаціях.

*Об'єкт дослідження* – нестационарні неізотермічні процеси течії газу в багатониткових лінійних ділянках газотранспортної системи.

*Предмет дослідження* – математична модель та метод розрахунку нестационарних неізотермічних процесів течії газу в багатониткових лінійних ділянках газотранспортної системи.

*Методи дослідження* – чисельні методи розв'язання крайових задач для систем диференціальних рівнянь в частинних похідних та методи розв'язання нелінійних і лінійних систем рівнянь; методи теорії ймовірності і математичної статистики для ідентифікації аварійних ситуацій на багатониткових лінійних ділянках ГТС.

**Наукова новизна одержаних результатів.** У дисертаційній роботі виконано науково-практичну задачу математичного моделювання нестационарних, у тому числі позаштатних, режимів роботи багатониткових лінійних ділянок ГТС і, зокрема, розробки обчислювального забезпечення в межах моделі. У процесі роботи автором отримано такі нові наукові результати:

- *удосконалено* існуючі математичні моделі нестационарних неізотермічних режимів роботи багатониткових лінійних ділянок газотранспортної системи шляхом внесення до моделі алгебраїчних рівнянь, у тому числі нелінійних, які враховують вплив роботи комутуючих елементів газотранспортної системи (запірної арматури), що дозволяє брати до уваги зміни в структурі газотранспортної системи;

- *вперше* запропоновано чисельний метод розрахунку нестационарних

неізотермічних режимів роботи багатониткових лінійних ділянок газотранспортної системи, що відрізняється від нині існуючих методів способом розв'язання системи нелінійних рівнянь і дозволяє з більшою точністю розраховувати і прогнозувати реальні процеси течії газу. Відповідна нелінійна система була отримана при розв'язанні системи рівнянь у частинних похідних і узгоджуваних співвідношень математичної моделі методом скінченних різниць. При розв'язанні нелінійної системи методом Ньютона частина рівнянь залишаються нелійними. Ці рівняння відповідають деяким умовам узгодження параметрів газового потоку у вузлах газотранспортної системи, де з'єднуються ділянки трубопроводу. На кожному кроці методу Ньютона, по-перше, спрощується система рівнянь за рахунок лінійних перетворень, по-друге, отриманий розв'язок корегується за рахунок нелінійних рівнянь умов узгодження;

– *вперше* запропоновано метод ідентифікації аварійних ситуацій при витоків газу, який базується на удосконаленій математичній моделі, що дозволяє значно швидше і точніше виявляти й локалізувати аварійні ділянки трубопроводу. Запропонований метод ідентифікації аварійних ситуацій містить оцінки параметрів витоків газу, зокрема місце знаходження витоків на багатонитковій лінійній ділянці газотранспортної системи.

**Практичне значення** отриманих результатів полягає в тому, що удосконалена модель та розроблені чисельні методи розрахунку нестационарних режимів роботи багатониткових ділянок ГТС дозволяють з необхідною точністю обчислювати параметри газового потоку (тиск, масову витрату і температуру), аналіз яких необхідний у плануванні технологічних режимів роботи багатониткових лінійних ділянок ГТС і в прийнятті рішень у системах оперативно-диспетчерського керування. Метод ідентифікації аварійних ситуацій дозволяє запобігати можливим аварійним ситуаціям на багатониткових лінійних ділянках ГТС і отримувати оцінки параметрів витоків газу, що підвищує безпечність і надійність об'єктів ГТС, знижує можливі економічні збитки від аварії.

Модель і методи впроваджені у виробничий процес на філіалі «Науково-дослідний і проектний інститут транспорту газу» (Інститут транспорту газу) ДК «Укртрансгаз» у рамках розроблення проекту 393.10-ДП «Впровадження диспетчерського пункту Харківського лінійного виробничого управління магістрального газопроводу» (акт впровадження від 14.11.2012 р.), використовуються у навчальному та науково-дослідному процесах на кафедрі прикладної математики Харківського національного університету радіоелектроніки при викладанні дисципліни «Математичне моделювання систем з розподіленими параметрами» (під час проведення лабораторних робіт та семінарських занять), а також у дипломному проектуванні (акт впровадження від 12.02.2013 р.).

**Особистий внесок здобувача.** Всі положення, що виносяться на захист, отримані здобувачем особисто і опубліковані в роботах [1-17]. У роботах, які опубліковані у співавторстві, здобувачеві належить: у роботах [1, 15] розв'язано задачу моделювання нестационарного неізотермічного режиму течії газу через запірну арматуру на ГТС; у роботах [2, 10] розроблено чисельний метод розрахунку нестационарних неізотермічних режимів роботи лінійних ділянок; у роботах [3, 11]

проведено порівняльний аналіз і вибір скінченно-різницевої схем апроксимації рівнянь математичної моделі; в роботах [4, 14] розроблено математичну модель нестационарних неізотермічних режимів роботи багатониткових лінійних ділянок ГТС, що включає математичні моделі ділянок трубопроводу і запірної арматури, та наведено чисельний метод розрахунку цих режимів (при чому модель крана враховує ступінь його перекриття); у роботах [6, 17] проведено чисельний аналіз нестационарних неізотермічних режимів роботи магістрального газопроводу «Шебелінка–Белгород–Курськ–Брянськ» на основі вдосконаленої математичної моделі; у роботах [7, 16] розроблено метод ідентифікації аварійних ситуацій при витоках газу і отримано оцінки параметрів витоків газу на основі розробленої математичної моделі; у статті [8] проведено математичне моделювання аварійних ситуацій, пов'язаних з повним розривом ділянки трубопроводу ГТС; у тезах [9] проведено дослідження чисельних методів розв'язання систем диференціальних рівнянь у частинних похідних, що описують істотно нестационарні неізотермічні режими транспортування газу багатонитковими лінійними ділянками газотранспортної системи; у тезах [12] проведено чисельний аналіз впливу зміни кроку дискретизації за часовою змінною скінченно-різницевої сітки при фіксованому кроці по просторовій змінній для розрахунку нестационарних неізотермічних режимів течії газу лінійною ділянкою ГТС, а також визначення інтервалу часу перехідного процесу в залежності від зміни кроку дискретизації за часовою змінною скінченно-різницевої сітки.

**Апробація результатів дисертації.** Матеріали дисертаційних досліджень доповідалися, обговорювалися і схвалені на наступних науково-технічних конференціях і форумах: 8-му, 10-му, 12-му міжнародних молодіжних форумах «Радіоелектроніка і молодь в ХХІ столітті» (Харків, 2004 р., 2006 р., 2008 р.); 8-й всеукраїнській (Третій міжнародній) студентській науковій конференції з прикладної математики та інформатики «СНКПМІ-2005», (Львів, 2005 р.); 1-й, 2-й міжнародних конференціях «Глобальні інформаційні системи. Проблеми і тенденції розвитку» (Харків-Туапсе, 2006 р., 2007 р.); X міжнародній науково-технічній конференції «Системний аналіз та інформаційні технології» (Київ, 2008 р.); Міжнародній науковій конференції «Інтелектуальні системи прийняття рішень і проблеми обчислювального інтелекту» (Євпаторія, 2010 р.); Міжнародній науково-технічній конференції «Інформаційні системи і технології в енергетиці та житлово-комунальній сфері» (Ялта, 2011р.).

**Публікації.** Основні положення дисертаційної роботи опубліковані у 17 друкованих працях (1 стаття в зарубіжному виданні і 7 статей у наукових журналах, які включені до переліку наукових фахових видань України, та 9 публікацій у працях конференцій).

**Структура і обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, одинадцяти додатків. Обсяг дисертації – 240 сторінок, у тому числі 156 сторінок основного тексту, 84 сторінок додатків. Дисертація містить 63 рисунки (28 сторінок), 18 таблиць (10 сторінок) та список використаних джерел із 109 найменувань на 12 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми, сформульовані мета і завдання дослідження, розкриті наукова новизна і практична значимість отриманих результатів.

У першому розділі представлено огляд літератури за темою дисертаційної роботи, описано структуру багатониткових лінійних ділянок газотранспортної системи України, виявлено основні проблеми математичного моделювання нестационарних режимів роботи багатониткових ділянок ГТС, названо основні причини аварійних ситуацій на багатониткових ділянках, що пов'язані з витокami газу чи повним розривом ділянки трубопроводу, і розглянуто існуючі методи ідентифікації аварійних ситуацій, описано їх переваги та недоліки.

Виконаний в роботі аналіз існуючих математичних моделей і чисельних методів розрахунку нестационарних режимів роботи багатониткових ділянок ГТС дозволив зробити висновок про необхідність удосконалення існуючих математичних моделей та розроблення ефективних чисельних методів розрахунку нестационарних режимів, які б дозволили визначати (з високою швидкістю і точністю) складні, просторово розподілені багатониткові лінійні ділянки з урахуванням динаміки зміни параметрів течії газу на входах і виходах газотранспортної системи, а також динаміки роботи запірної арматури та можливих витоків газу, розривів ділянок та ін. За результатами проведеного аналізу було сформульовано мету та задачі дослідження, обмежено коло поставлених у дисертаційній роботі завдань.

У другому розділі удосконалено математичну модель нестационарних режимів роботи багатониткових ділянок ГТС. Сформульовано основні задачі моделювання штатних і аварійних ситуацій, які виникають під час експлуатації багатониткових ділянок ГТС.

Структура багатониткових лінійних ділянок ГТС задається орієнтованим графом  $G = (V, M)$ , де  $V$  – множина вузлів графа,  $M$  – множина дуг графа. Дугами графа  $G = (V, M)$  є ділянки трубопроводів і запірної арматури (умовно всі види запірної арматури названо кранами), а вершинами графа – вузли з'єднання ділянок трубопроводу і запірної арматури, а також входи і виходи багатониткових лінійних ділянок ГТС.

Отже, множина дуг  $M = M_1 \cup M_2$  – це об'єднання взаємно непересічних множин  $M_1$  та  $M_2$ , де  $M_1$  – множина дуг графа, відповідна ділянкам трубопроводу,  $M_2$  – множина дуг графа, відповідна кранам. Множина вузлів  $V = V_1 \cup V_2 \cup V_3 \cup V_4 \cup V_5$  – це об'єднання взаємно непересічних множин, де  $V_1$  – множина входів багатониткових лінійних ділянок газотранспортної системи,  $V_2$  – множина проміжних вузлів,  $V_3$  – множина виходів багатониткових лінійних ділянок ГТС,  $V_4$  – множина входів усіх кранів з  $M_2$ ,  $V_5$  – множина виходів усіх кранів з  $M_2$ . Кожний елемент множин  $M$  та  $V$  характеризується унікальним номером.

Множини  $M$  і  $V$  є скінченними ( $m_1 = |M_1|$ ,  $m_2 = |M_2|$ ,  $v_1 = |V_1|$ ,  $v_2 = |V_2|$ ,  $v_3 = |V_3|$ ,  $v_4 = |V_4|$ ,  $v_5 = |V_5|$ ).

За допомогою графа  $G$  удосконалена математична модель нестационарних неізотермічних режимів роботи ділянок ГТС враховує структуру ГТС і умови узгодження параметрів газового потоку в вузлах з'єднання і розгалуження елементів ГТС. Система рівнянь моделі включає підсистеми диференціальних рівнянь у частинних похідних для кожної  $i$ -ої ( $i \in M_1$ ) дуги графа, що описують течію газу по відповідній ділянці трубопроводу, підсистеми алгебраїчних рівнянь для кожної  $i$ -ої ( $i \in M_2$ ) дуги, що описують течію газу через крани, і підсистеми алгебраїчних рівнянь, що відповідають умовам узгодження параметрів газового потоку в  $m$ -их ( $m \in V_2 \cup V_4 \cup V_5$ ) вузлах ГТС, і має вигляд:

$$\frac{\partial \varphi^i}{\partial t} + B^i \frac{\partial \varphi^i}{\partial x} = \Phi^i, \quad i \in M_1, \quad (1)$$

$$P^i(x^{++}, t) = P^i(x^+, t) - \zeta_i \frac{Rg}{2(S^j)^2} \frac{T^i(x^{++}, t) z^i(x^{++}, t)}{P^i(x^{++}, t)} (G^i(x^+, t))^2, \quad j \in M_1, i \in M_2, \quad (2)$$

$$T^i(x^{++}, t) = T^i(x^+, t) - D_J (P^i(x^+, t) - P^i(x^{++}, t)), \quad i \in M_2, \quad (3)$$

$$\sum_{j \in V_m^+} G^j(x^{++}, t) = \sum_{i \in V_m^-} G^i(x^+, t), \quad m \in V_2 \cup V_4 \cup V_5, \quad (4)$$

$$P_{\text{вуз}}^m(t) = P^j(x^{++}, t) = P^i(x^+, t), \quad j \in V_m^+, \quad i \in V_m^-, \quad m \in V_2 \cup V_4 \cup V_5, \quad (5)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{j \in V_m^+} ((G^j(x^{++}, t))^+ \cdot T^j(x^{++}, t)) + \sum_{i \in V_m^-} ((G^i(x^+, t))^- \cdot T^i(x^+, t)) = \\ & = T_{cp}^m(t) \cdot \left( \sum_{j \in V_m^+} ((G^j(x^{++}, t))^+ + \sum_{i \in V_m^-} (G^i(x^+, t))^-) \right), \quad m \in V_2 \cup V_4 \cup V_5, \end{aligned} \quad (6)$$

якщо  $G^j(x^{++}, t) < 0$ , то  $T^j(x^{++}, t) = T_{cp}^m(t)$ ,  $j \in V_m^+$ ,

якщо  $G^i(x^+, t) > 0$ , то  $T^i(x^+, t) = T_{cp}^m(t)$ ,  $i \in V_m^-$ ,

де  $\varphi^i = (W^i(x, t), P^i(x, t), T^i(x, t))$  – вектор змінних питомої масової витрати ( $\text{кг}/(\text{м}^2\text{с})$ ), тиску ( $\text{Па}$ ), температури ( $\text{К}$ ) газу, які відповідають  $i$ -ій ( $i \in M_1$ ) дузі графа;  $t$  – часова координата ( $\text{с}$ );  $x$  – просторова координата ( $\text{м}$ );  $B^i = B^i(x, t, \varphi)$ ,  $\Phi^i = \Phi^i(x, t, \varphi)$  – матриці, які мають вигляд:



$$B^i = \begin{bmatrix} 2\alpha_i T^i S^i \frac{W^i}{P^i} & 1 - \alpha_i T^i S^i \frac{(W^i)^2}{(P^i)^2} & 0 \\ \alpha_i T^i S^i & 0 & 0 \\ \alpha_i (\gamma_i - 1) S^i \frac{(T^i)^2}{P^i} & 0 & \alpha_i \gamma_i T^i S^i \frac{W^i}{P^i} \end{bmatrix}; \quad \Phi^i = \begin{bmatrix} -\beta_i T^i S^i \frac{W^i |W^i|}{P^i} - \frac{g}{\alpha_i} \frac{P^i}{T^i S^i} \frac{dh}{dx} \\ 0 \\ -\frac{4K}{D^i} (\gamma_i - 1) \frac{T^i}{P^i} (T^i - T_{zp}) - g(\gamma_i - 1) \frac{T^i W^i}{P^i} \frac{dh}{dx} \end{bmatrix};$$

$$\alpha_i = \alpha_i(P, T) = \frac{z^i(P, T) g R}{S^i}; \quad \beta_i = \beta_i(P, T) = \frac{\lambda(\text{Re}, \varepsilon) \alpha_i}{2D^i}; \quad \gamma_i = \gamma_i(P, T) = \frac{C_p(P, T)}{C_p(P, T) - z^i(P, T) g R};$$

$C_p(P, T)$  – питома теплоємність газу (Джс/(кг·К));  $\lambda(\text{Re}, \varepsilon)$  – коефіцієнт гідравлічного опору;  $\text{Re}$  – число Рейнольдса;  $\varepsilon$  – відносна шорсткість внутрішньої поверхні трубопроводу;  $K$  – коефіцієнт теплопередачі від труби до ґрунту (Вт/(м<sup>2</sup>·К));  $T_{zp}$  – температура ґрунту (К);  $h$  – глибина залягання труби (м);  $g$  – прискорення вільного падіння (м/с<sup>2</sup>);  $z^i(P, T)$  – коефіцієнт стисливості;  $D^i, S^i$  – діаметр ділянок трубопроводу (м), площа поперечного перерізу ділянок трубопроводу, які відповідають  $i$ -ій ( $i \in M_1$ ) дузі графа;  $\zeta_i$  – коефіцієнт місцевого гідравлічного опору;  $G^i(x^+, t), P^i(x^+, t), T^i(x^+, t)$  – масова витрата (кг/с), тиск (Па) і температура (К) газу на початку  $i$ -ої дуги відповідно;  $G^i(x^{++}, t), P^i(x^{++}, t), T^i(x^{++}, t)$  – масова витрата (кг/с), тиск (Па) і температура (К) газу в кінці  $i$ -ої дуги відповідно (верхній індекс показує належність відповідного параметра до певної дуги графа);  $S^j$  – площа поперечного перерізу (м<sup>2</sup>) ділянки трубопроводу, що відповідає  $j$ -ій ( $j \in M_1$ ) дузі, прилеглий до кінця  $i$ -ої ( $i \in M_2$ ) дуги на виході крана;  $x^+, x^{++}$  – початок і кінець відповідної дуги;  $V_m^+, V_m^-$  – множини індексів дуг, які входять і виходять з  $m$ -го ( $m \in V_2 \cup V_3 \cup V_4$ ) вузла графа відповідно і будуються для кожного  $m$ -го вузла;  $P_{\text{вуз}}^m(t)$  – тиск газу (Па) в  $m$ -му вузлі графа;  $T_{cp}^m(t)$  – середня температура газу (К), який «витікає» з вузла багатониткової лінійної ділянки ГТС, що відповідає  $m$ -му вузлу графа;  $D_j$  – коефіцієнт Джоуля-Томпсона. Масова витрата газу виражається формулою:  $G = W \cdot S$ , де  $S$  – площа поперечного перерізу ділянки трубопроводу.

Функції  $W^i(x, t), P^i(x, t), T^i(x, t)$  задано в просторово-часовій області  $\Omega_i = \{(x, t) : 0 \leq x \leq L_i, 0 \leq t \leq T\}$ , де  $L_i$  – довжина  $i$ -ої ( $i \in M_1$ ) ділянки трубопроводу,  $T$  – час розрахунку. Вважаємо, що ці функції неперервно-диференційовані в заданій області за змінними  $x, t$ . Система рівнянь (1) – це квазілінійна система диференціальних рівнянь у частинних похідних гіперболічного типу, яка отримана із загальних законів газової динаміки для одновимірного випадку і описує нестационарні неізотермічні режими течії газу ділянкою трубопроводу, яка являє

собою циліндричну трубу постійного діаметра. Система рівнянь (2), (3) – це система двох алгебраїчних рівнянь (рівняння місцевих втрат тиску і збереження енергії), що описує течію газу через кран. Рівняння (2) виражається нелінійною квадратичною функцією, а (3) – лінійною функцією.

Для постановки задачі моделювання і аналізу нестационарних режимів роботи багатониткових лінійних ділянок задаються граничні і початкові умови. Початкова умова визначається завданням розподілу параметрів газового потоку (розподіл питомих масових витрат, тисків і температур) у початковий момент часу, тобто

$$W^i(x,0) = W_0^i(x), \quad P^i(x,0) = P_0^i(x), \quad T^i(x,0) = T_0^i(x), \quad (7)$$

де  $W_0^i(x)$ ,  $P_0^i(x)$ ,  $T_0^i(x)$  – відомі функції;  $x \in [0, L_i]$ ,  $i \in M_1$ .

Граничні умови у вузлах графа, що відповідають входам і виходам багатониткових ділянок газотранспортної системи, задаються відповідним чином у кожному класі задач.

Гранична умова:

I типу:

$$P_{\text{вуз}}^m(t) = P^m(t), \quad (8)$$

II типу:

$$G_{\text{вуз}}^m(t) = G^m(t), \quad (9)$$

III типу:

$$T_{\text{вуз}}^m(t) = T^m(t), \quad (10)$$

IV типу:

$$\Phi(P_{\text{вуз}}^m(t), G_{\text{вуз}}^m(t)) = 0, \quad (11)$$

де  $m$  – номер вузла, в якому задано відповідну умову ( $m \in V_1$  або  $m \in V_3$ );  $P_{\text{вуз}}^m(t)$ ,  $G_{\text{вуз}}^m(t)$ ,  $T_{\text{вуз}}^m(t)$  – тиск, масова витрата і температура газу в  $m$ -му вузлі графа відповідно;  $P^m(t)$ ,  $G^m(t)$ ,  $T^m(t)$  – задані функції.

У практичних розрахунках найчастіше задаються у вхідних вузлах ( $m \in V_1$ ) багатониткових ділянок ГТС граничні умови I або II типу і III типу, а у вихідних вузлах ( $m \in V_3$ ) – граничні умови I або II типу. Для задачі моделювання ситуацій, що пов'язані з розривом ділянки трубопроводу, у вузлах, де відбувається розрив, задаються граничні умови IV типу.

Класи задач, що розглядаються в дисертаційній роботі, пов'язані переважно або зі зміною граничних умов, або зі зміною структури розрахункового графа  $G$ , який формується на основі технологічної схеми багатониткових лінійних ділянок ГТС, або зі зміною параметрів моделі. Отже, розглядаються класи задач моделювання ситуацій відключення-підключення великих споживачів, відкриття-

закриття запірної арматури та моделювання аварійних ситуацій при розривах ділянок трубопроводу і при вибоках газу на багатониткових ділянках ГТС. Під вибоками газу маються на увазі насамперед несанкціоновані відбори газу, оскільки питання визначення несанкціонованих відборів газу та запобігання їм є важливим.

Клас задач виявлення та локалізації аварійних ситуацій при вибоках газу полягає у побудові групи критеріїв виявлення вибоків, які ґрунтуються на вимірюваних та розрахункових даних. При розв'язанні крайової задачі отримуємо результати розрахунку параметрів газового потоку (тиск  $P(x,t)$ , масову витрату  $G(x,t)$ , температуру  $T(x,t)$ ). У кожному замірному вузлі вимірюються надлишковий тиск газу  $\tilde{P}_n(t)$ , об'ємна витрата газу  $\tilde{Q}_{0n}(t)$ , температура газу  $\tilde{T}_n(t)$ , де  $t$  – момент часу (дискретний),  $n$  – номер замірного вузла,  $n = \overline{1, k_1 + k_2}$ ,  $k_1$  – кількість вхідних замірних вузлів,  $k_2$  – кількість вихідних вузлів. Після обробки оперативних даних та усунення випадкових і систематичних похибок під час вимірювання системою моніторингу оперативних даних отримуємо значення тиску, масової витрати, температури з кожного замірного вузла у момент часу  $t$ .

Критерій прийняття рішень  $K$  щодо наявності вибоків газу на ділянці трубопроводу між вхідним та вихідним замірними вузлами на одноступовій лінійній ділянці має вигляд:  $K = R \wedge P \wedge M$ , де  $R = R_0 \wedge R_1 \wedge \dots \wedge R_l$  – логічна змінна, отримана методом знаків збільшень тиску на послідовних інтервалах  $[t_1, t_2], [t_2, t_3], \dots, [t_l, t_{l+1}]$ ;  $M = M_0 \wedge M_1 \wedge \dots \wedge M_m$  – логічна змінна, отримана методом розрахунку динамічного балансу на послідовних інтервалах  $[t_1, t_2], [t_2, t_3], \dots, [t_m, t_{m+1}]$ ;  $P = P_0 \wedge P_1 \wedge \dots \wedge P_k$  – логічна змінна, отримана методом знаків збільшень витрат на послідовних інтервалах  $[t_1, t_2], [t_2, t_3], \dots, [t_k, t_{k+1}]$ ;  $m, k, l$  – параметри, чисельні значення яких залежать від тривалості вибоку і технічних вимог до системи визначення вибоків і визначаються шляхом налагодження системи.

Якщо цей критерій застосовується для багатониткових лінійних ділянок, то метод знаків збільшень тиску не використовують.

**Третій розділ** присвячений розробленню чисельного методу розрахунку нестационарних неізотермічних режимів роботи багатониткових ділянок і методів виявлення й локалізації аварійних ситуацій. Розв'язано задачі моделювання і аналізу ситуацій, пов'язаних з роботою багатониткових ділянок ГТС, що наведені у другому розділі.

Для розв'язання задачі моделювання ситуацій, пов'язаних з відключенням-підключенням великих споживачів та з відкриттям-закриттям запірної арматури необхідно знайти сукупність функцій, яка включає множину функцій  $\{\varphi^i = (W^i(x,t), P^i(x,t), T^i(x,t)), (x,t) \in \Omega_i\}_{i \in M_1}$  для ділянок трубопроводу, множину функцій  $\{P^i(x^+,t), T^i(x^+,t), P^i(x^{++},t), T^i(x^{++},t), G^i(x^+,t), t \in [0,T]\}_{i \in M_2}$  для запірної арматури, множину функцій  $\{P_{\text{вуз}}^m(t), T_{\text{сп}}^m(t)\}_{m \in V_2 \cup V_4 \cup V_5}$  для проміжних вузлів. Ця сукупність функцій є розв'язком задачі (1) – (6) з початковими умовами (7) і граничними умовами (8) або (9) і (10) для всіх  $m$ -их вузлів ( $m \in V_1$ ) та граничними

умовами (8) або (9) для всіх  $m$ -их вузлів ( $m \in V_3$ ). Зауважимо, що, виходячи з фізичного змісту змінних  $W^i(x,t)$ ,  $P^i(x,t)$ ,  $T^i(x,t)$ , область визначення системи (1) при фіксованому  $i$  ( $i \in M_1$ ) має вигляд  $\overline{\Omega}_i = \{(x,t,W^i,P^i,T^i) : 0 \leq x \leq L_i, 0 \leq t \leq T, P^i(x,t) > 0, T^i(x,t) > 0, \text{ де } W^i(x,t), P^i(x,t), T^i(x,t) \in C^{(1,1)}([0,L_i] \times [0,T])\}$ . У рівнянні (2) параметри  $S^j > 0$ ,  $P^i(x^{++},t) > 0$  невід'ємні. Отже, виходячи з теоретичних засад теорії газової динаміки, слід очікувати існування гладкого розв'язку задачі в позначеній області  $\overline{\Omega}_i$ . У роботі пропонується здійснити чисельне розв'язання даної задачі методом скінченних різниць. Просторово-часову область  $\Omega_i$  розбиваємо скінченно-різницевою сіткою  $\Omega_{\Delta x, \Delta t}^i = \{x_n = n\Delta x_i, n = \overline{0, N_i}, t^k = k\Delta t, k = \overline{0, M_t}, M_t = \left\lceil \frac{T}{\Delta t} \right\rceil\}$  з просторовим кроком  $\Delta x_i = L_i/N_i$  по кожній  $i$ -ій ( $i \in M_1$ ) ділянці трубопроводу та з часовим кроком  $\Delta t = T/M_t$ . Апроксимація рівнянь системи виконується різницевиими рівняннями з використанням неявної скінченно-різницевої схеми, яка визначена на чотириточковому або на п'ятиточковому шаблонах. Перша схема визначена на чотириточковому шаблоні з різницевим оператором другого порядку апроксимації за просторовою змінною і першого порядку за часовою змінною. Друга схема визначена на п'ятиточковому шаблоні з різницевиими операторами другого порядку апроксимації за просторовою і часовою змінними. У дисертаційній роботі наведено експериментальні дані, які дозволили виділити умови застосування обох шаблонів скінченно-різницевої схеми. Зокрема, система (1) для чотириточкового шаблону має вигляд:

$$\frac{1}{\Delta t} \varphi_0^{k,i} - \frac{1}{\Delta x_i} B_0^{k,i} \varphi_0^{k,i} + \frac{1}{\Delta x_i} B_0^{k,i} \varphi_1^{k,i} = \Phi_0^{k,i} + \frac{1}{\Delta t} \varphi_0^{k-1,i}, \quad (12)$$

$$-\frac{1}{2\Delta x_i} B_n^{k,i} \varphi_{n-1}^{k,i} + \frac{1}{\Delta t} \varphi_n^{k,i} + \frac{1}{2\Delta x_i} B_n^{k,i} \varphi_{n+1}^{k,i} = \Phi_n^{k,i} + \frac{1}{\Delta t} \varphi_n^{k-1,i}, \quad n = \overline{1, N_i - 1}, \quad (13)$$

$$\frac{1}{\Delta t} \varphi_{N_i}^{k,i} + \frac{1}{\Delta x_i} B_{N_i}^{k,i} \varphi_{N_i}^{k,i} - \frac{1}{\Delta x_i} B_{N_i}^{k,i} \varphi_{N_i-1}^{k,i} = \Phi_{N_i}^{k,i} + \frac{1}{\Delta t} \varphi_{N_i}^{k-1,i}, \quad i \in M_1, \quad (14)$$

де  $\varphi_n^{k,i}$  – вектори змінних  $(W_n^{k,i}, P_n^{k,i}, T_n^{k,i})$  у вузлах скінченно-різницевої сітки  $\Omega_{\Delta x, \Delta t}^i$  на  $k$ -му часовому шарі для кожної  $i$ -ої дуги;  $B_n^{k,i}$ ,  $\Phi_n^{k,i}$  – матриці  $B^i$  та  $\Phi^i$ , елементи яких визначаються в кожній точці розбиття скінченно-різницевої сітки  $\Omega_{\Delta x, \Delta t}^i$  ( $n = \overline{0, N_i}$ ).

У рівняннях (2) – (6) неперервні функції замінюються функціями у вузлах скінченно-різницевої сітки. Таким чином, отримується нелінійна система рівнянь, розв'язання якої здійснюється методом Ньютона. Для розв'язання і спрощення нелінійної системи рівнянь у роботі запропоновано певні перетворення.

Оскільки довжина ділянок трубопроводу істотно більша за розміри запірної арматури, то дуга графа, що відповідає запірній арматурі, замінюється на два сусідніх вузли, один з яких є входом, а інший – виходом запірної арматури, і виникають умови узгодження в цих вузлах. При формуванні системи рівнянь математичної моделі у відповідності зі структурою багатониткових ділянок ГТС два рівняння для ділянки трубопроводу, що описують збереження кількості руху та енергії, замінюються на рівняння моделі запірної арматури.

Далі із системи рівнянь (2) – (6), (12) – (14) вилучається множина функцій  $\{P^i(x^+,t), T^i(x^+,t), P^i(x^{++},t), T^i(x^{++},t), G^i(x^+,t)\}_{i \in M_2}$ ,  $\{P_{\text{вуз}}^m(t)\}_{m \in V_4 \cup V_5}$  за допомогою умов узгодження у вузлах графа, які є входом і виходом запірної арматури. Множина функцій  $\{P_{\text{вуз}}^m(t)\}_{m \in V_2}$  також вилучається із системи за допомогою умов узгодження.

Тоді у системі рівнянь (2) – (6), (12) – (14) залишаються тільки змінні з ділянок трубопроводу у вузлах сітки  $\Omega_{\Delta x, \Delta t}^i$  і множини функцій  $\{T_{\text{ср}}^m(k\Delta t)\}_{m \in V_2}$ . Розшукується сукупність сіткових функцій, що включає множину функцій  $\varphi^{k,i} = \{(W_n^{k,i}, P_n^{k,i}, T_n^{k,i})\}_{n=0}^{N_i}, k = \overline{1, M_t}\}_{i \in M_1}$ , які є наближенням функцій розв'язків в областях  $\overline{\Omega_i}$ , та множину функцій  $\{T_{\text{ср}}^{m,k}, k = \overline{1, M_t}\}_{m \in V_2}$  для проміжних вузлів з  $V_2$ .

На кожному кроці методу Ньютона, по-перше, проводимо лінійні перетворення, а саме: за допомогою умов узгодження, вилучаються лінійно залежні змінні за питомою масовою витратою і тиском, а саме: для ділянки  $j_0$  ( $j_0 \in V_m^+$ ) з умов узгодження (4) виражається змінна за питомою масовою витратою газу  $\delta W_{N_{j_0}}^{k,r,j_0}$  і замінюється її у всіх рівняннях, де вона зустрічається, на вираз вигляду:

$$\delta W_{N_{j_0}}^{k,r,j_0} = \frac{1}{S^{j_0}} \left( \sum_{i \in V_m^-} S^i \delta W_0^{k,r,i} - \sum_{\substack{j \in V_m^+ \\ j \neq j_0}} S^j \delta W_{N_j}^{k,r,j} \right), \quad m \in V_2,$$

де  $\delta \varphi_n^{k,r,j} = (\delta W_n^{k,r,j}, \delta P_n^{k,r,j}, \delta T_n^{k,r,j})$  – вектор поправок до вектора змінних  $\varphi^{k,r,j}$ , який визначається формулою

$$\delta \varphi_n^{k,r,j} = \varphi_n^{k,r-1,j} - \varphi_n^{k,r,j}, \quad n = \overline{0, N_j},$$

для кожної  $j$ -ої ділянки (для  $i$ -ої ділянки маємо вектор  $\delta \varphi_n^{k,r,i}$ );  $r$  – номер ітерації методу Ньютона;  $S^i, S^j$  – площа поперечного перерізу ділянки трубопроводу ( $j \in V_m^+, i \in V_m^-$ ).

Далі у відповідності з умовами узгодження (5) залишається одна змінна за

тиском  $\delta P_0^{k,r,i_0}$  ( $i_0 \in V_m^-$ ), а інші змінні за тиском  $\delta P_{N_j}^{k,r,j}$  та  $\delta P_0^{k,r,i}$  за допомогою співвідношення

$$\delta P_{N_j}^{k,r,j} = \delta P_0^{k,r,i} = \delta P_0^{k,r,i_0}, \quad j \in V_m^+, \quad i \in V_m^-, \quad i \neq i_0$$

вилучається із системи рівнянь.

Після низки послідовних перетворень і спрощень, які наведено в роботі, отримана система лінійних рівнянь розв'язується методом Гаусса з вибором головного елемента і знаходяться поправки за всіма змінними на кожному часовому шарі і кожній ітерації, крім виключених із системи. Вилучені змінні визначаються з умов узгодження.

По-друге, на кожному кроці методу Ньютона у відповідності з нелінійними рівняннями (6), які безпосередньо не розв'язуються за методом Ньютона, визначається середня температура  $T_{cp}^{m,r,k}$  у проміжних вузлах ділянок ГТС і редагуються змінні з температури газу (який «виходить» з вузла) відповідно до співвідношення (6).

Проводилися дослідження стійкості, збіжності та порядку апроксимації скінченно-різницевої схем, які наведені в роботі. Зокрема, було встановлено, що для ділянки трубопроводу неявна скінченно-різницева схема, яка визначена на чотириточковому шаблоні, є стійкою. Апроксимація системи рівнянь (1) скінченно-різницевою схемою проводиться з першим порядком апроксимації за часовою змінною і з другим порядком – за просторовою змінною. При цьому порядок швидкості збіжності співпадає з порядком апроксимації різницевої схеми.

Виявлення витоків газу на багатониткових ділянках ГТС, які пов'язані з несанкціонованими відборами газу, – це складне завдання. Такі витoki можуть тривати від кількох днів до кількох місяців, що спричиняє втрати газу на ГТС і економічні збитки. У роботі запропоновано метод ідентифікації аварійних ситуацій, який полягає в застосуванні розробленого чисельного методу розрахунку нестационарних неізотермічних режимів роботи багатониткових ділянок і методів статистичного оцінювання параметрів газового потоку. До останніх належать відомі: метод розрахунку динамічного балансу газу; метод знаків збільшення витрат; метод знаків збільшення тисків.

До основних параметрів витoku газу, які визначаються в дисертаційній роботі, належать: об'єм, час виникнення витoku і місце його розташування.

У рамках визначення місця розташування витoku пропонується розв'язати задачу умовної оптимізації, в якій цільова функція є результатом порівняння розрахункових і вимірюваних параметрів газового потоку (тиск, об'ємна витрата і температура газу) в замірних вузлах багатониткових лінійних ділянок газотранспортної системи.

Для знаходження місця розташування витoku на  $i$ -ій дузі графа, що відповідає ділянці трубопроводу між входними і вихідними замірними вузлами у момент часу  $t$

( $t \in [t_{ноч}; t_{кін}]$ ), необхідно мінімізувати цільову функцію вигляду:

$$F(X) = \int_{t_{ноч}}^{t_{кін}} \left[ \sum_{n=1}^{k_1} \frac{1}{\hat{\sigma}_{Q_{0n}}^2} \left( \hat{Q}_{0n}(t) - \hat{Q}_{0n}(X, t) \right)^2 + \sum_{m=k_1+1}^{k_1+k_2} \frac{1}{\hat{\sigma}_{P_m}^2} \left( \tilde{P}_m(t) - \hat{P}_m(X, t) \right)^2 + \sum_{m=k_1+1}^{k_1+k_2} \frac{1}{\hat{\sigma}_{T_m}^2} \left( \tilde{T}_m(t) - \hat{T}_m(X, t) \right)^2 \right] dt \rightarrow \min_{\substack{0 \leq X \leq L_i \\ i \in M_1, X \in \Omega}},$$

де  $\Omega$  – системи рівнянь (1) – (6) до і після місця розташування витoku  $X$  з відповідними початковими умовами і граничними умовами I та III типу на входах багатониткових ділянок і II типу на виходах багатониткових ділянок, та умовами узгодження параметрів газового потоку в точці  $X$ ;  $\hat{Q}_{0n}(X, t)$ ,  $\hat{P}_m(X, t)$ ,  $\hat{T}_m(X, t)$  – розрахункові значення параметрів газового потоку (наведена об'ємна витрата, тиск і температура) в кожному  $n$ -му замірному вузлі ( $n = \overline{1, k_1 + k_2}$ );  $\hat{Q}_{0n}(X, t)$  – оцінка вимірювань наведеної об'ємної витрати в  $n$ -му вхідному замірному вузлі ( $n = \overline{1, k_1}$ );  $\tilde{P}_m(X, t)$ ,  $\tilde{T}_m(X, t)$  – результати вимірювань тиску і температури в  $m$ -му вихідному вузлі ( $m = \overline{k_1 + 1, k_1 + k_2}$ );  $\hat{\sigma}_{Q_{0n}}^2$ ,  $\hat{\sigma}_{P_m}^2$ ,  $\hat{\sigma}_{T_m}^2$  – дисперсії всіх вимірювань параметрів газового потоку.

Розв'язання цієї задачі здійснюється методом спрямованого пошуку.

У **четвертому розділі** проведено верифікацію запропонованих чисельних методів для конкретних задач течії газу багатонитковими лінійними ділянками. У роботі здійснено чисельний аналіз тестових прикладів розв'язання всіх класів задач моделювання нестационарних режимів роботи багатониткових ділянок ГТС.

Зокрема, було розглянуто чисельний експеримент з розрахунку нестационарного режиму роботи багатониткової ділянки магістрального газопроводу «Шебелінка–Белгород–Курськ–Брянськ» (Ш-Б) між дотискувальною компресорною станцією «Червонодонецька» (ЧДКС) та Юліївським газоконденсатним родовищем (ГКР) Харківського лінійного виробничого управління. Розрахунковий граф магістрального газопроводу Ш-Б представлено на рисунку 1.

Транспортування шебелінського газу до теплоелектроцентралі № 5 (ТЕЦ-5) відбувається за допомогою ЧДКС по системі газопроводів Ш-Б і відводу Ду 700 (загальна довжина до ТЕЦ-5 складає 152 км, з яких більша частина трубопроводу має діаметр 700÷980 мм). Розрахунок здійснювали для пікових навантажень ТЕЦ-5, а саме для зимової пори.

Початковий стаціонарний розподіл параметрів газового потоку для цього прикладу отримано в результаті чисельного моделювання. Цей розподіл порівнювався з результатами вимірювань параметрів потоку на магістральному газопроводі Ш-Б у вузлах, які є входами і виходами газопроводу. Задавалися граничні умови на входах газопроводу Ш-Б і виході з газорозподільної станції (ГРС) ТЕЦ-5 (вузли 0, 1, 2, 3), значення яких подані на рисунку 1. По всіх інших виходах

газопроводу задана гранична умова II типу, де витрати газу постійні і сумарно складають 7.4688 млн м<sup>3</sup> на добу.

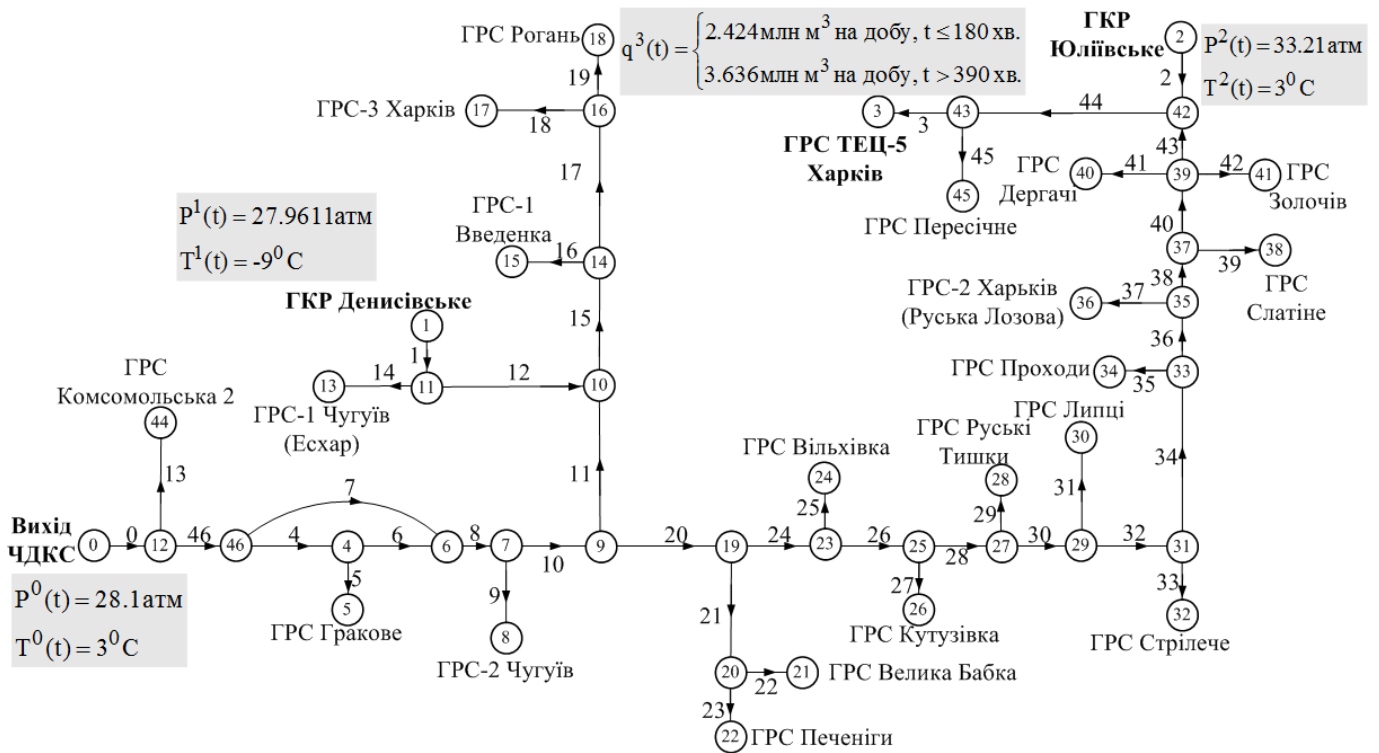


Рисунок 1 – Розрахунковий граф лінійної ділянки магістрального газопроводу «Шебелінка-Белгород-Курськ-Брянськ».

Ставилося завдання з визначення стабільного і безаварійного режиму роботи газопроводу Ш-Б у разі, якщо працює максимальна кількість електрогенераторів на ТЕЦ-5, і за умови, що тиск на ТЕЦ-5 не буде нижче мінімального критичного тиску (10,16 атм). При цьому вхідний тиск задано постійним. Стабільну роботу ТЕЦ-5 забезпечують три електрогенератори. У тестовому прикладі промодельовано включення максимальної кількості  $n=3$  встановлених електрогенераторів на ТЕЦ-5, що відповідає зміні витрати газу у вузлі 3. На рисунку 2 відображено результати розрахунку нестационарного режиму магістрального газопроводу запропонованим у роботі чисельним методом.

Проаналізовано перехідний процес течії газу, пов'язаний зі збільшенням споживання газу ТЕЦ-5, до початку сталого режиму по всій системі газопроводу. Було виявлено, що при заданих початкових та граничних умовах на входах і виходах газопроводу та піковому навантаженні на ТЕЦ-5 (у зимовий період) по закінченні перехідного процесу тиск на ТЕЦ-5 ( $P = 21,6252 \text{ атм}$ ) не падає нижче критично допустимого рівня. Тому режим роботи магістрального газопроводу можна вважати безпечним і безаварійним. Отже, в разі необхідності включення ТЕЦ-5 на повну потужність магістральний газопровід «Шебелінка-Белгород-Курськ-Брянськ» зможе безперервно забезпечувати споживачів газом у заданому обсязі при заданому тиску.



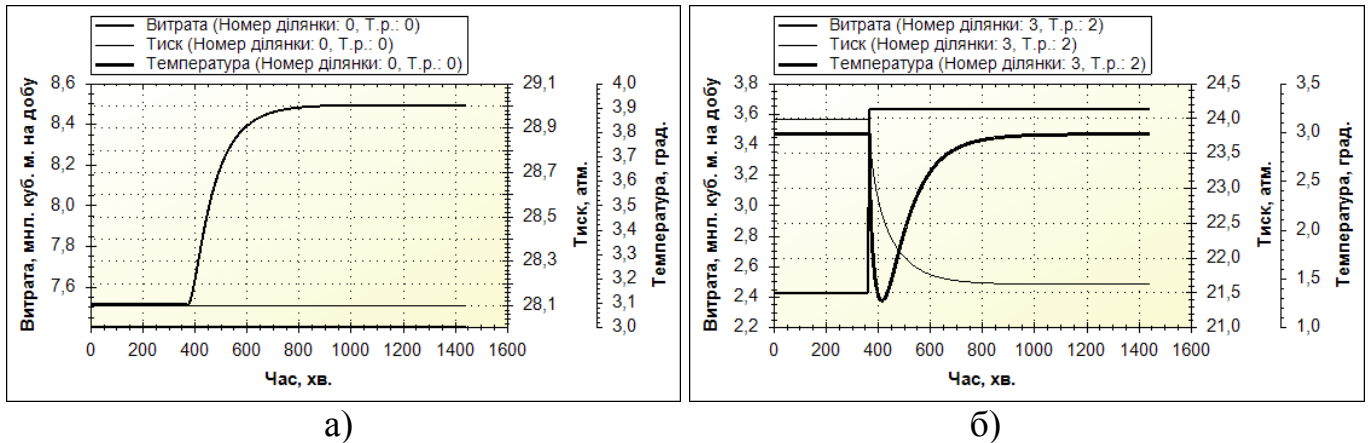


Рисунок 2 – Графіки зміни тиску, витрати і температури: а) на 0-ій ділянці, що відповідає виходу з ЧДКС; б) на 3-ій ділянці, що відповідає ГРС ТЕЦ-5

У додатках наведено документи, які підтверджують впровадження отриманих результатів, і доповнення до основного змісту роботи.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі виконано науково-практичне дослідження щодо математичного моделювання і чисельного аналізу нестационарних неізотермічних режимів роботи багатониткових лінійних ділянок ГТС.

Проведені дослідження дали можливість зробити такі основні висновки:

1. Проведений аналіз проблем математичного моделювання нестационарних режимів роботи багатониткових лінійних ділянок ГТС дозволив встановити, що для забезпечення ефективної роботи ГТС, необхідно створення автоматизованих систем диспетчерського керування, які базуються на удосконаленні математичної моделі та чисельних методах розрахунку нестационарних режимів. Це дасть можливість прогнозувати режими роботи багатониткових ділянок ГТС і забезпечить безперервний моніторинг параметрів газу, що транспортується, а отже допоможе уникати аварійних ситуацій.

2. Удосконалена математична модель нестационарних неізотермічних режимів роботи багатониткових лінійних ділянок ГТС шляхом внесення до неї алгебраїчних рівнянь, зокрема і нелінійних, які враховують вплив роботи комутуючих елементів газотранспортної системи (запірної арматури), дозволяє брати до уваги відповідні зміни у структурі ГТС.

3. Розроблений чисельний метод розрахунку нестационарних неізотермічних режимів роботи багатониткових лінійних ділянок ГТС, що відрізняється від нині існуючих способом розв'язання системи нелінійних рівнянь, дозволяє з високою точністю розраховувати реальні процеси течії газу на багатониткових лінійних ділянках ГТС і дає можливість використовувати його у системах диспетчерського керування.

4. Побудована скінченно-різницева схема апроксимації математичної моделі, яка визначена на п'ятиточковому шаблоні, дозволила розрахувати нестационарні процеси течії газу складними, просторово розподіленими багатонитковими

лінійними ділянками в 1,2 – 1,5 раза швидше, при зменшенні часового кроку  $\Delta t \leq 5$  хв, у порівнянні з різницевою схемою, визначеною на чотириточковому шаблоні.

5. Розроблений метод ідентифікації аварійних ситуацій при вибоках газу, який базується на удосконаленій математичній моделі, дозволяє з високими швидкістю і точністю виявити й локалізувати аварійну ділянку трубопроводу і таким чином знизити можливі збитки від аварій, а також спрогнозувати безпечні режими роботи багатониткових лінійних ділянок ГТС.

6. Впровадження у виробничий процес на філіалі «Науково-дослідний і проектний інститут транспорту газу» ДК «Укртрансгаз» моделі та розроблених чисельних методів розрахунку нестационарних режимів роботи багатониткових ділянок дозволило в ході прогнозування технологічних режимів отримати інформацію про динаміку зміни в часі основних параметрів газового потоку та режимів течії газу по розгалужених багатониткових лінійних ділянках ГТС і обрати оптимальні та безпечні стратегії керування технологічними процесами в реальних умовах. Використання моделі та методів у системах диспетчерського керування у разі виявлення аварійних ситуацій на ГТС дозволило істотно скоротити час на локалізацію аварійної ділянки і зменшити обсяги втрат газу й негативний вплив на довкілля.

7. Адекватність удосконаленої математичної моделі та розроблених чисельних методів розрахунку нестационарних режимів роботи багатониткових ділянок ГТС перевірено на магістральному газопроводі «Шебелінка-Белгород-Курськ-Брянськ». Результати розрахунків з необхідною точністю збігаються з результатами вимірювань, отриманих системою моніторингу оперативних даних. Похибка отриманих розрахункових значень параметрів газового потоку не перевищує похибки датчиків вимірювання, яка, зокрема, становить для датчиків тиску  $\pm 0,5$  % (0,5 атм).

Матеріали дисертаційної роботи використовуються в курсовому й дипломному проектуванні та в процесі науково-дослідної роботи студентів.

## **ПЕРЕЛІК РОБІТ, ОПУБЛІКОВАНИХ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Моделирование нестационарных неизотермических режимов транспорта и распределения природного газа в газотранспортной системе / А. Д. Тевяшев, И. Г. Гусарова, А. В. Каминская, Ю. В. Буданцева // Трубопроводные системы энергетики: математическое моделирование и оптимизация / Отв. ред. Н. Н. Новицкий. – Новосибирск: Наука, 2010. – С. 149–169.

2. Тевяшев А. Д. Эффективный метод и алгоритм расчета нестационарных неизотермических режимов транспорта газа в газотранспортной сети произвольной структуры / А. Д. Тевяшев, И. Г. Гусарова, А. В. Чуркина (А. В. Каминская) // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2006. – 2/3 (20). – С. 39–44.

3. Тевяшев А. Д. Математическая модель и метод расчета нестационарных режимов в линейных участках магистральных газопроводах / А. Д. Тевяшев, И. Г. Гусарова, А. В. Каминская // Радиоэлектроника и информатика. – 2007. – № 2 (37). – С. 144–150.

4. Тевяшев А. Д. Учет динамики работы запорной арматуры при моделировании нестационарных режимов транспорта газа в магистральных газопроводах / А. Д. Тевяшев, И. Г. Гусарова, А. В. Каминская // Автоматизированные системы управления и приборы автоматики. – 2009. – № 147. – С. 104–113.

5. Каминская А. В. Численный анализ нестационарных режимов работы многониточных линейных участков газотранспортной системы при различных режимах работы запорной арматуры / А. В. Каминская // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2009. – 6/3 (42). – С. 21–25.

6. Каминская А. В. Численный анализ режимов работы газораспределительных сетей высокого давления / А. В. Каминская, И. Г. Гусарова // Радиоэлектроника и информатика. – 2011. – № 3 (54). – С. 50–54.

7. Тевяшев А. Д. Метод идентификации аварийного участка с учетом модели нестационарных режимов работы газотранспортной системы / А. Д. Тевяшев, И. Г. Гусарова, А. В. Каминская // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2012. – 1/3 (55). – С. 38–46.

8. Гусарова И. Г. Математическое моделирование и анализ аварийных ситуаций при разрыве участка трубопровода / И. Г. Гусарова, А. В. Каминская // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2012. – 4/4 (58). – С. 19–23.

9. Чуркина А. В. Система информационной поддержки процессов принятия решений по управлению режимами работы в газотранспортной сети / Ю. В. Буданцева, А. В. Чуркина (А. В. Каминская) // Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке: 8-й международный молодежный форум : сб. материалов конференции, 13-15 апреля 2004 г., Харьков. Ч. 2. – Х.: ХНУРЭ, 2004. – С. 199.

10. Чуркіна А. В. Математичне моделювання та чисельний аналіз нестационарних неізотермічних режимів транспортування газу в газотранспортній мережі / А. В. Чуркіна (А. В. Камінська), Ю. В. Буданцева // СНКПМІ – 2005: Восьма всеукраїнська (Третя міжнародна) студентська наукова конференція з прикладної математики та інформатики : тези доповідей, 14-15 квітня 2005 р., Львів. – Львів: ЛНУ, 2005. – С. 122–124.

11. Чуркина А. В. Использование различных конечно-разностных схем в расчетах нестационарных неізотермических режимов транспорта газа по участку магистрального газопровода / А. В. Чуркина (А. В. Каминская), Ю. В. Буданцева // Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке: 10-й юбилейный международный молодежный форум : сб. материалов форума, 10-12 апреля 2006 г., Харьков. – Х.: ХНУРЭ, 2006. – С. 539.

12. Гусарова И. Г. Некоторые вопросы анализа численных экспериментов по расчету нестационарных неізотермических режимов транспорта газа по линейному участку / И. Г. Гусарова, А. В. Чуркина (А. В. Каминская) // Глобальные информационные системы. Проблемы и тенденции развития: 1-я Международная конференция : сб. материалов конференции, 3-6 октября 2006 г., Харьков-Туапсе. – Х.: ХНУРЭ, 2006. – С. 180–181.

13. Каминская А. В. Численный анализ результатов моделирования нестационарных режимов транспорта газа по многониточному магистральному

газопроводу / А. В. Каминская // Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке: 12-й международный молодежный форум : сб. материалов форума, 1-3 апреля 2008 г., Харьков. Ч. 2. – Х.: ХНУРЭ, 2008. – С. 355.

14. Гусарова И. Г. Учет влияния регулирующих кранов при численном моделировании нестационарных неизотермических режимов транспорта газа магистральными газопроводами / И. Г. Гусарова, А. В. Каминская // Современные информационные системы. Проблемы и тенденции развития: 2-я Международная научная конференция : сб. материалов конференции, 2-5 октября 2007 г., Харьков-Туапсе. – Х.: ХНУРЭ, 2007. – С. 257–258.

15. Гусарова И. Г. Моделирование режимов транспорта газа по многониточному магистральному газопроводу / И. Г. Гусарова, Ю. В. Буданцева, А. В. Каминская // X Міжнародна науково-технічна конференція «Системний аналіз та інформаційні технології» : зб. матеріалів конференції, 20-24 травня 2008 р., Київ. – К.: НТУУ «КПІ» 2008. – С. 72.

16. Тевяшев А. Д. Идентификация аварийных участков при моделировании нестационарных режимов работы многониточных линейных участков газотранспортной системы / А. Д. Тевяшев, А. В. Каминская, И. Г. Гусарова // Интеллектуальные системы принятия решений и проблемы вычислительного интеллекта : сб. материалов конференции, 17-21 мая 2010 г., Евпатория. Том 2. – Херсон: ХНТУ, 2010. – С. 160–164.

17. Каминская А. В. Об одном подходе численного анализа режимов работы газораспределительных сетей высокого давления / А. В. Каминская, И. Г. Гусарова // Информационные системы и технологии в энергетике и жилищно-коммунальной сфере: тезисы докладов, 1-6 октября 2011 г., Ялта. – Х.: НТМТ, 2011. – С. 39–40.

## АНОТАЦІЯ

**Камінська А. В. Математичне моделювання та чисельний аналіз нестационарних режимів роботи багатониткових лінійних ділянок газотранспортної системи.** – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи. – Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, 2013.

Дисертаційна робота присвячена удосконаленню математичної моделі та розробленню чисельних методів розрахунку нестационарних режимів роботи багатониткових лінійних ділянок газотранспортної системи в різних ситуаціях, у тому числі аварійних, пов'язаних з відключенням-підключенням великих споживачів, з відкриттям-закриттям запірної арматури, розривами ділянок трубопроводу та виникненням витоків газу з багатониткових лінійних ділянок газотранспортної системи.

В дисертації удосконалено математичну модель нестационарних неизотермічних режимів роботи багатониткових лінійних ділянок газотранспортної системи та розроблено чисельний метод розрахунку таких режимів.

З метою своєчасного виявлення аварійних ситуацій у випадках витoku газу запропоновано метод, який базується на розробленій математичній моделі. Запропонований метод ідентифікації аварійних ситуацій містить оцінки параметрів витоків газу, зокрема місце знаходження витoku на багатонитковій лінійній ділянці газотранспортної системи. Це дозволяє виявити і локалізувати аварійну ділянку трубопроводу і таким чином знизити можливі збитки від аварії, а також спрогнозувати безпечні режими роботи багатониткових лінійних ділянок газотранспортної системи.

**Ключові слова:** багатониткова лінійна ділянка, нестационарні неізотермічні режими роботи, газотранспортна система, аварійна ділянка, метод скінченних різниць.

## АННОТАЦІЯ

**Каминская А. В. Математическое моделирование и численный анализ нестационарных режимов работы многониточных линейных участков газотранспортной системы. – Рукопись.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.05.02 – математическое моделирование и вычислительные методы. – Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, 2013.

Диссертационная работа посвящена усовершенствованию математической модели и разработке численных методов расчета нестационарных режимов работы многониточных линейных участков газотранспортной системы в различных ситуациях, в том числе аварийных, связанных с отключением-подключением крупных потребителей, с открытием-закрытием запорной арматуры, разрывами участков трубопровода и возникновением утечек на многониточных линейных участках газотранспортной системы. На сегодня задача моделирования таких режимов является актуальной, поскольку позволит решить большинство проблем, связанных с обеспечением контроля за качеством и количеством транспортируемого газа по многониточным линейным участкам газотранспортной системы.

Исследования, проведенные в работе, позволили усовершенствовать математическую модель нестационарных неізотермических режимов работы многониточных линейных участков газотранспортной системы путем внесения в модель алгебраических уравнений, в том числе нелинейных, которые учитывают влияние работы коммутирующих элементов газотранспортной системы (запорной арматуры), что позволяет учитывать изменения структуры газотранспортной системы. Усовершенствованная модель представляет собой систему уравнений, включающая в себя подсистемы дифференциальных уравнений в частных производных, описывающие режимы течения газа по участкам трубопровода, подсистемы алгебраических уравнений, описывающие режимы течения через запорную арматуру, и подсистемы алгебраических уравнений условий согласования параметров газового потока в узлах многониточных линейных участков газотранспортной системы, структура которых задана графом.

На основе предлагаемой математической модели сформулированы и решены классы задач моделирования и анализа нестационарных неизотермических режимов работы многониточных участков газотранспортной системы, связанные с изменением граничных условий на входах и выходах системы, либо с изменением структуры расчетного графа, либо с изменением параметров моделей. Получены все решения рассматриваемых классов задач, основанные на предлагаемом численном методе.

В работе предлагается численный метод расчета нестационарных неизотермических режимов работы многониточных линейных участков газотранспортной системы, отличающийся от существующих способом решения системы нелинейных уравнений, полученной после применения метода конечных разностей к исходной системе уравнений математической модели. Метод позволяет с более высокой точностью рассчитывать реальные процессы течения газа с учетом различных положений запорной арматуры как в штатных, так и в аварийных ситуациях.

Одной из важных задач, возникающих при эксплуатации многониточных линейных участков, является возможность своевременного обнаружения аварийных ситуаций. С этой целью в работе предложен метод идентификации аварийных ситуаций, связанных с утечками газа, который основан на усовершенствованной математической модели, и позволяющий с более высокой скоростью и точностью обнаружить и локализовать аварийный участок трубопровода, и тем самым снизить возможный ущерб от аварий, а также прогнозировать безопасные режимы работы многониточных линейных участков газотранспортной системы. Предложенный метод идентификации аварийных ситуаций содержит оценки параметров утечек газа, в частности местонахождение утечки на многониточном линейном участке газотранспортной системы.

**Ключевые слова:** многониточный линейный участок, нестационарные неизотермические режимы работы, газотранспортная система, аварийный участок, метод конечных разностей.

## ABSTRACT

**Kaminska A. V. Mathematical modeling and numerical analysis for nonstationary modes of multi-line linear sections of the gas transportation system. – Manuscript.**

The thesis for a candidate of technical science (Ph. D.) degree in speciality 01.05.02 – mathematical modeling and computational methods. – Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, 2013.

The thesis describes improvement of the mathematical model and development of the numerical methods for computation of nonstationary operation modes of multi-line linear sections of the gas transportation system in various situations, including emergency operation modes, connecting and disconnection of the bulk consumers, opening and closing of the block valves, pipe sections breaks, and leaks in the pipeline section of the multi-line linear segments of the gas transportation system.

The mathematical model of nonstationary and nonisothermal operation modes of multi-line linear sections of the gas transportation system was improved and the numerical method of such operating modes was developed in the study.

For timely detection of emergency situation during the leak, a method was introduced in the study. The method is based on using of the developed method for computing of the nonstationary and nonisothermal operation modes of multi-line linear sections of the gas transportation system. The emergency situation detection method during the leak includes gas leaks detection and obtaining estimated values of the natural gas leaks parameters, namely location of the leak on the multi-line linear sections of the gas transportation system. That allows to detect and localize the emergency section of the pipeline, and thereby reduce the potential loss after accidents as well as forecast safe operating modes of the multi-line linear sections of the gas transportation system.

**Keywords:** multi-line linear section, nonstationary and nonisothermal operating modes, gas transportation system, emergency section, finite difference method.