

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

БОЯРСЬКА ЮЛІЯ ВОЛОДИМИРІВНА

УДК 004.942 : 519.6 : 621.6

**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ЧИСЕЛЬНИЙ АНАЛІЗ
НЕСТАЦІОНАРНИХ НЕІЗОТЕРМІЧНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ
ГАЗОТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМ**

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;

кандидат технічних наук, доцент, старший науковий співробітник

Пономарьов Юрій Володимирович, філія «Науково-дослідний і проектний інститут транспорту газу» (Інститут транспорту газу) ПАТ «Укртрансгаз», заступник директора з наукової роботи.

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

В. В. Безкорвайний

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Однією з відмінних особливостей режимів роботи української газотранспортної системи (ГТС) є високий ступінь їх нестаціонарності. Такі режими, особливо викликані аварійними ситуаціями, важко передбачувані і погано керовані, а їх наслідки можуть призводити до величезних збитків. У зв'язку з цим, при експлуатації ГТС приділяється велика увага питанням забезпечення її надійності та безпеки. Однак на практиці повністю виключити ризик аварій на ГТС неможливо, тому гостро постає питання щодо способу забезпечення жорсткого, стабільного і безпечного технологічного режиму, своєчасного запобігання аваріям, а також ефективного управління ГТС. На сучасному рівні розвитку ГТС вирішення таких проблем ґрунтується, насамперед, на вдосконаленні управління технологічними процесами подачі та розподілу газу на базі сучасних технічних засобів. Це можливо, в тому числі, і завдяки математичному моделюванню нестаціонарних неізотермічних режимів роботи ГТС, яке дає можливість описувати і прогнозувати штатні і позаштатні режими роботи ГТС, включаючи аварійні ситуації та їх наслідки як на лінійних ділянках (ЛД), так і на компресорних станціях (КС). Це дає можливість фахівцям, які експлуатують трубопровідні системи і керують транспортними потоками, проводити складний чисельний аналіз поведінки технічних систем в різних ситуаціях, а також дозволяє набути навичок оптимальної та безаварійної експлуатації ГТС.

Проблемі моделювання нестаціонарних неізотермічних режимів роботи ГТС присвячена велика кількість робіт вітчизняних і зарубіжних вчених, які досягли значних результатів у цій галузі (роботи М. Г. Сухарева, Є. Р. Ставровського, Н. Н. Новицького, А. П. Меренкова, І. А. Чарного, М. В. Лур'є, В. А. Юфіна, В. Є. Селезньова, С. О. Сарданашвілі, А. Г. Євдокимова, А. Д. Тевяшева, І. Г. Гусарової, J. Kralik, P. Stiegler та інших). Але, не дивлячись на це, залишається чимало невирішених проблем і існує необхідність уточнення старих і одержання нових математичних моделей, чисельних методів і підходів до розрахунку режимів роботи трубопроводів і їх систем. Зокрема, сучасні математичні моделі та методи розрахунку нестаціонарних неізотермічних режимів роботи ГТС складної структури (що враховують, крім іншого, спільну роботу активних (КС) і пасивних елементів (ділянок трубопроводу (ДТ)) або мають обмежену область застосування, або спрощені, не враховують складність об'єкта моделювання і розраховують всі процеси, що відбуваються при транспортуванні газу, з недостатньою точністю, а тому потребують удосконалення.

У зв'язку з цим подана дисертаційна робота набуває актуальності, а її результати мають велике практичне значення, оскільки дозволяють вирішити проблему підвищення якості та ефективності оперативно-диспетчерського управління ГТС.

Зв'язок роботи з науковими програмами, темами, планами. Дисертаційна робота виконувалась відповідно до плану науково-дослідних робіт кафедри прикладної математики Харківського національного університету радіоелектроніки в рамках держбюджетних тем: № 236-5 «Розробка та впровадження математичних моделей, методів і інструментальних засобів багатокритеріальної оптимізації

режимів функціонування систем енергетики в умовах невизначеності» (ДР № 0109U002571) та № 254-5 «Розробка моделей, методів та інструментальних засобів структурної і параметричної оптимізації інженерних мереж з витокami» (ДР №0111O002624). В рамках тем автором, як одним із виконавців робіт, були розроблені математична модель нестационарних неізотермічних режимів течії газу по ДТ, що враховує ефект Джоуля-Томсона, а також математичні моделі та чисельні методи розрахунку нестационарних неізотермічних режимів роботи ГТС складної структури, які дозволяють проводити спільний розрахунок режимів роботи КС та іншого технологічного обладнання газопроводу.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є розробка математичних моделей та чисельних методів розрахунку нестационарних неізотермічних режимів роботи ГТС складної структури з багатонитковими ЛД та КС, що дозволяють розраховувати і прогнозувати штатні і позаштатні режими роботи ГТС, а також наслідки розвитку аварійних ситуацій.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішуються такі задачі:

– розробка та визначення області застосування математичної моделі нестационарних неізотермічних режимів течії газу по ДТ, що більш адекватно описує температурний та гідравлічний режими при течії газу, а саме, що враховує ефект Джоуля-Томсона при адиабатичному дроселюванні газу;

– побудова адекватних математичних моделей нестационарних неізотермічних режимів роботи ГТС складної структури з багатонитковими ЛД та КС, які дозволяють моделювати різні режими роботи ГТС, як штатні, так і позаштатні, в тому числі нерівномірне добове споживання газу, перехід з одного режиму роботи ГТС на інший, відключення/підключення крупного споживача, зміну режимів роботи та аварії на КС, а також роботу систем автоматичного управління (САУ) компресорними цехами (КЦ);

– розробка чисельних методів розв'язання систем рівнянь побудованих математичних моделей, що дозволяють із заданою точністю розраховувати нестационарні неізотермічні режими роботи ГТС складної структури, представлені у вигляді технологічних або розрахункових схем.

Об'єкт дослідження – нестационарні неізотермічні режими роботи ГТС складної структури з багатонитковими ЛД та КС.

Предмет дослідження – математичні моделі та методи розрахунку нестационарних неізотермічних режимів роботи ГТС складної структури з багатонитковими ЛД та КС, які враховують вплив дросель-ефекту зміни температури газу по всій довжині ДТ.

Методи дослідження. У дисертаційній роботі для моделювання нестационарних неізотермічних режимів роботи ГТС використовуються різницеві методи розв'язання систем диференціальних рівнянь в частинних похідних і чисельні методи розв'язання систем нелінійних та лінійних алгебраїчних рівнянь.

Наукова новизна результатів дисертаційної роботи. Проведені в дисертаційній роботі дослідження дозволили вирішити задачу математичного моделювання штатних і позаштатних нестационарних неізотермічних режимів роботи ГТС складної структури з багатонитковими ЛД та КС. У рамках вирішення цієї задачі отримано такі нові наукові результати.

1. *Удосконалено* математичну модель нестационарних неізотермічних режимів течії газу по ділянці трубопроводу, що являє собою систему квазілінійних диференціальних рівнянь гіперболічного типу у частинних похідних, шляхом урахування в рівнянні енергії ефекту Джоуля-Томсона при адіабатичному дроселюванні газу. *Це дозволило* більш адекватно описувати температурні та гідравлічні режими транспорту та розподілу газу як по ділянці трубопроводу, так і по всій газотранспортній системі.

2. *Удосконалено* існуючі математичні моделі нестационарних неізотермічних режимів роботи газотранспортної системи з багатонитковими лінійними ділянками та компресорними станціями шляхом внесення в модель функціональних рівнянь, які описують режими роботи активних елементів – компресорних станцій, що складаються з газоперекачувальних агрегатів і апаратів повітряного охолодження. *Це дозволило* моделювати керуючий вплив на режими роботи газотранспортної системи і адекватно і більш повно описувати технологічні схеми та режими роботи газотранспортної системи.

3. *Вперше* запропоновано чисельний метод розрахунку нестационарних неізотермічних режимів роботи газотранспортної системи складної структури з багатонитковими лінійними ділянками та компресорними станціями, який *відрізняється від відомих* способом урахування функціональних рівнянь, які описують режими роботи активних елементів (компресорних станцій), при розв'язанні нелінійної системи рівнянь, а також способом розв'язання лінійної системи рівнянь, отриманої на кожному кроці методу Ньютона. *Це дозволило* скоротити розмірність лінійної системи, збільшити точність розрахунків і проводити спільний розрахунок режимів роботи компресорних станцій і ділянок трубопроводу.

4. *Удосконалено* математичну модель нестационарних неізотермічних режимів роботи газотранспортної системи шляхом задання граничних умов у проміжних вузлах графа мережі (виходи компресорних цехів), який описує структуру газотранспортної системи, *що дозволило* враховувати роботу систем автоматичного управління компресорними цехами. *Запропоновано* чисельний метод розв'язання отриманої системи рівнянь, *що дозволило* розширити можливості моделювання роботи компресорного цеху та застосовувати запропоновані модель та метод для розрахунків нестационарних неізотермічних режимів роботи газотранспортної системи у випадках, коли працюють системи автоматичного управління компресорними цехами.

Практичне значення результатів дисертаційної роботи. Розроблені математичні моделі і методи розрахунку нестационарних неізотермічних режимів роботи ГТС складної структури дозволяють із заданою точністю моделювати несталі режими роботи ГТС; проводити типові розрахунки при експлуатації газопроводів; контролювати, планувати, описувати і прогнозувати режими роботи ГТС; проводити докладний комплексний аналіз передаварійної або аварійної ситуації і, на підставі цього, давати рекомендації щодо керуючого впливу; оцінювати альтернативні варіанти рішень, що приймаються при оперативному управлінні. Результати дисертації є базою для прийняття рішень і дають можливість забезпечити виконання ГТС її функціонального призначення при всій сукупності збурюючих факторів, технологічних обмежень і відмов її окремих елементів, що

зумовлені аварійними ситуаціями або профілактичними роботами. Отримані результати можуть бути використані для оперативно-диспетчерського управління складними трубопровідними системами, для розробки і функціонування автоматичної системи управління цими системами, а також для розв'язання низки оптимізаційних задач, що виникають при експлуатації ГТС.

Розроблені математичні моделі і чисельні методи впроваджені в філії «Науково-дослідний і проектний інститут транспорту газу» (Інститут транспорту газу) ДК «Укртрансгаз» НАК «Нафтогаз України» (акт впровадження від 17.12.2012 р.), а також на кафедрі прикладної математики Харківського національного університету радіоелектроніки при викладанні дисципліни «Математичне моделювання систем з розподіленими параметрами» та у курсовому і дипломному проектуванні (акт впровадження від 12.02.2013 р.).

Особистий внесок здобувача. Усі результати дисертаційної роботи, які виносяться на захист, отримані автором особисто і опубліковані в роботах [1 – 18], що містять в собі всі теоретичні та практичні дослідження автора в галузі математичного моделювання нестационарних неізотермічних режимів роботи ГТС. У роботах, опублікованих у співавторстві, автору належать такі результати: [1, 16] – запропоновано математичну модель та чисельний метод розрахунку нестационарних режимів роботи ГТС складної структури з багатонитковими ЛД та КС; [2, 10] – запропоновано математичну модель нестационарних неізотермічних режимів течії газу по ДТ, що враховує в рівнянні енергії ефект Джоуля-Томсона; [3, 11] – запропоновано математичну модель режимів роботи апарату повітряного охолодження (АПО), а також метод розрахунку нестационарних неізотермічних режимів роботи ГТС складної структури, що містить КЦ з АПО; [4, 17] – розроблено математичну модель режимів роботи ГТС з урахуванням роботи САУ КЦ, та чисельний метод розв'язання системи рівнянь моделі; [5] – запропоновано спрощену модель режимів роботи газоперекачувального агрегату (ГПА) та модель режимів роботи групи паралельно працюючих ГПА; побудовано математичну модель нестационарних неізотермічних режимів течії газу по багатонитковому магістральному газопроводу, що складається з ДТ та КС, та запропоновано метод розрахунку системи рівнянь побудованої моделі; [6, 13] – запропоновано математичну модель та чисельний метод розрахунку нестационарних неізотермічних режимів течії газу по фрагменту ГТС з активними елементами, що складається з двох ДТ та ГПА; [7, 18] – промодельовано і проаналізовано перехідні режими роботи магістрального газопроводу Шебелинка – Белгород – Курськ – Брянськ (ШБКБ) з метою перевірки гіпотези щодо можливості повного відключення Червонодонської дотискувальної КС; [8] – запропоновано чисельний метод розв'язання системи рівнянь математичної моделі нестационарних неізотермічних режимів роботи ГТС, пов'язаних з аварійним відключенням КЦ; [9] – проведено дослідження та аналіз нестационарних режимів течії газу по ділянці ГТС; [12] – запропоновано моделі нестационарних неізотермічних режимів течії газу по ДТ і умов узгодження параметрів газу в проміжних вузлах фрагмента ГТС; [14] – запропоновано математичну модель режимів роботи групи послідовно працюючих ГПА; [15] – досліджено вплив величини кроків скінченно-різницевої сітки за часом і

простором на точність та збіжність розрахунків при моделюванні режимів роботи магістрального газопроводу з активними елементами.

Усі чисельні експерименти виконані автором особисто. Автор брав безпосередню участь у написанні статей і тез доповідей, у виступах на конференціях і семінарах. Внесок дисертанта в поданій роботі є визначальним.

Апробація результатів дисертації. Матеріали дисертаційних досліджень доповідалися, обговорювалися і були схвалені на таких науково-технічних конференціях, форумах і семінарах: 9-му, 10-му Міжнародному молодіжному форумі «Радиоэлектроника и молодежь в XXI в.» (Харків, 2005 р., 2006 р.); Восьмій, одинадцятій всеукраїнській (третій, шостій міжнародній) студентській науковій конференції з прикладної математики та інформатики СНКПМІ – 2005, 2008 (Львів, 2005 р., 2008 р.); 1-й міжнародній конференції «Глобальные информационные системы. Проблемы и тенденции развития» (Харків – Туапсе, 2006 р.); ІХ, Х Міжнародній науково-технічній конференції «Системний аналіз та інформаційні технології» (Київ, 2007 р., 2008 р.); ІІ Міжнародній науково-технічній конференції молодих вчених «Проблеми енергоефективності в газовому комплексі» (Київ – Гурзуф, 2007 р.); 3-му Міжнародному радіоелектронному форумі «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» МРФ - 2008. (Міжнародній конференції «Информационные компьютерные технологии и системы») (Харків, 2008 р.); ХІ Всеросійському науковому семінарі з міжнародною участю «Математические модели и методы анализа и оптимального синтеза развивающихся трубопроводных и гидравлических систем» (Іркутськ, Росія, 2008 р.); Міжнародній науковій конференції «Интеллектуальные системы принятия решений и проблемы вычислительного интеллекта» (Херсон – Євпаторія, 2010 р.); Міжнародному науковому семінарі ім. Ю. М. Руденка «Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики», 82-му засіданні семінару: «Проблемы исследования и обеспечения надежности либерализованных систем энергетики» (Іркутськ – с. Кореіз, м. Ялта, АР Крим, Україна, 2010 р.); Міжнародній науково-технічній конференції «Информационные системы и технологии в энергетике и жилищно-коммунальной сфере» ИСТЭ 2011 (Ялта, 2011 р.).

Публікації. За темою дисертаційної роботи опубліковано 18 друкованих праць, серед них 1 стаття в зарубіжному виданні, 6 статей у виданнях, які увійшли до переліків наукових фахових видань України з технічних наук, 10 публікацій у збірниках доповідей та тез доповідей за матеріалами науково-технічних конференцій та форумів.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, 11 додатків. Обсяг дисертації – 255 сторінок, у тому числі 151 сторінка основного тексту, додатків – 89 сторінок. Дисертація містить 82 рисунки (25 сторінок), 10 таблиць (12 сторінок) та список використаних джерел із 136 найменувань на 15 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету та визначено задачі дослідження, показано зв'язок роботи з

науковими темами, викладено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, відзначено особистий внесок автора.

У першому розділі на основі огляду літературних джерел здійснено аналіз проблеми за темою дисертаційної роботи та сформульовано задачу дослідження. Проведено аналіз сучасного стану ГТС і проблеми транспорту газу. Розглянуто особливості режимів роботи ГТС і взаємодії її об'єктів між собою, а також пов'язані з цим проблеми математичного моделювання нестационарних неізотермічних ГТС. Внаслідок зробленого аналізу відзначено недоліки та проблеми існуючих математичних моделей, що використовуються для опису режимів роботи основних об'єктів ГТС, проблеми їх побудови та обмеженість області застосування. Зроблено огляд існуючих методів розрахунку нестационарних неізотермічних режимів роботи ГТС, описано їх переваги і недоліки. Обґрунтовано необхідність розробки та реалізації нових моделей та методів розрахунку нестационарних неізотермічних режимів роботи ГТС складної структури, які б надали можливість більш адекватно та з високою точністю розраховувати параметри безпечних та оптимальних режимів течії газу, при цьому методи повинні адекватно моделювати не тільки штатні, але й позаштатні, в тому числі і аварійні, режими роботи ГТС.

У другому розділі удосконалено математичну модель режимів течії газу по ДТ і моделі нестационарних неізотермічних режимів роботи ГТС складної структури з багатонитковими ЛД та КС.

Математична модель нестационарних неізотермічних режимів роботи ГТС. При побудові математичної моделі нестационарних неізотермічних режимів роботи ГТС структура системи представляється орієнтованим графом $G(V, M)$, дугами якого є основні технологічні об'єкти ГТС, а вершинами – вузли з'єднання декількох технологічних об'єктів, а також входи і виходи ГТС. Множина дуг графа M є об'єднанням взаємно непересічних множин $M = M_1 \cup M_2 \cup M_3 \cup M_4$, де M_1 – множина дуг, що відповідають ДТ, M_2 – множина дуг, що відповідають ГПА, M_3 – множина дуг, що відповідають АПО, M_4 – множина дуг, що відповідають запірній арматурі. Множина вузлів графа V є об'єднанням взаємно непересічних множин $V = V_1 \cup V_2 \cup V_3 \cup V_4 \cup V_5 \cup V_6 \cup V_7 \cup V_8 \cup V_9$, де V_1 – множина зовнішніх вузлів, що відповідають входам ГТС, V_2 – множина проміжних вузлів, що відповідають з'єднанню двох або більше ДТ, V_3 – множина зовнішніх вузлів, що відповідають виходам ГТС, V_4, V_5 – множини проміжних вузлів, що відповідають входам і виходам всіх ГПА з M_2 відповідно, V_6, V_7 – множини проміжних вузлів, що відповідають входам і виходам всіх АПО з M_3 відповідно, V_8, V_9 – множини проміжних вузлів, що відповідають входам і виходам всієї запірної арматури з M_4 відповідно. Дуги з M та вершини з V пронумеровані і позначені своїми номерами. Множини V і M – скінченні.

На підставі запропонованих структури ГТС, математичних моделей режимів роботи основних її об'єктів (пасивних – ДТ, запірної арматури, АПО і активних – ГПА), умов узгодження параметрів газового потоку в проміжних вузлах ГТС, структуру якої задано графом G , початкових і граничних умов, було удосконалено

існуючі математичні моделі нестационарних неізотермічних режимів роботи ГТС складної структури.

Причому при побудові цієї моделі було удосконалено математичну модель нестационарних неізотермічних режимів течії газу по ДТ, що являє собою систему квазілінійних диференціальних рівнянь гіперболічного типу у частинних похідних. Удосконалення здійснено шляхом урахування в рівнянні енергії при адіабатичному дроселюванні газу ефекту Джоуля-Томсона. Це дозволило більш адекватно описувати температурний та гідравлічний режими транспорту та розподілу газу по ДТ і по ГТС загалом.

У роботі запропоновано удосконалену математичну модель нестационарних неізотермічних режимів роботи ГТС складної структури з багатонитковими ЛД та КС, яка має такий вигляд:

$$\frac{\partial W^i}{\partial t} + \left(1 - \alpha_i S^i T^i \frac{(W^i)^2}{(P^i)^2}\right) \frac{\partial P^i}{\partial x} + 2\alpha_i S^i T^i \frac{W^i}{P^i} \frac{\partial W^i}{\partial x} + \beta_i S^i T^i \frac{W^i / |W^i|}{P^i} + \frac{g}{\alpha_i S^i T^i} \frac{dh}{dx} = 0, \quad i \in M_1, \quad (1)$$

$$\frac{\partial P^i}{\partial t} + \alpha_i S^i T^i \frac{\partial W^i}{\partial x} = 0, \quad i \in M_1, \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial T^i}{\partial t} + \frac{\alpha_i S^i \gamma_i}{T^i - \gamma_i D_j P^i} \frac{(T^i)^2 W^i}{P^i} \frac{\partial T^i}{\partial x} + \left(\frac{T^i \gamma_i}{T^i - \gamma_i D_j P^i} - 1 \right) \frac{\alpha_i S^i (T^i)^2}{P^i} \frac{\partial W^i}{\partial x} - \frac{\alpha_i S^i \gamma_i D_j}{T^i - \gamma_i D_j P^i} \frac{(T^i)^2 W^i}{P^i} \frac{\partial P^i}{\partial x} + \\ + \frac{4K(\gamma_i - 1)}{D^i} \frac{(T^i)^2 (T^i - T_{zp})}{P^i (T^i - P^i D_j \gamma_i)} + \frac{g(\gamma_i - 1)}{T^i - \gamma_i D_j P^i} \frac{(T^i)^2 W^i}{P^i} \frac{dh}{dx} = 0, \quad i \in M_1, \end{aligned} \quad (3)$$

$$P^i(x^{++}, t) = \varepsilon_i \cdot P^i(x^+, t), \quad i \in M_2, \quad (4)$$

$$T^i(x^{++}, t) = \varepsilon_i^{\frac{m_i - 1}{m_i}} \cdot T^i(x^+, t), \quad i \in M_2, \quad (5)$$

$$P^i(x^{++}, t) = P^i(x^+, t) - \Delta P_i, \quad i \in M_3, \quad (6)$$

$$T^i(x^{++}, t) = T^i(x^+, t) - \frac{Q_i \cdot 13,9489 \cdot 86400}{\rho_{в.см} \cdot G^i(x^{++}, t) \cdot \Delta \cdot C_{p,2} \cdot 10^6}, \quad i \in M_3, \quad (7)$$

$$P^i(x^{++}, t) = P^i(x^+, t) - \zeta_i \frac{R \cdot g}{2F_{KP}^2} \cdot \frac{T^i(x^{++}, t) \cdot z^i(x^{++}, t)}{P^i(x^{++}, t)} (G^i(x^+, t))^2, \quad i \in M_4, \quad (8)$$

$$T^i(x^{++}, t) = T^i(x^+, t) - D_j (P^i(x^+, t) - P^i(x^{++}, t)), \quad i \in M_4, \quad (9)$$

$$G^i(x^{++}, t) = G^i(x^+, t), \quad i \in M_2 \cup M_3 \cup M_4, \quad (10)$$

$$\sum_{j \in V_m^+} G^j(x^{++}, t) = \sum_{i \in V_m^-} G^i(x^+, t), \quad (11)$$

$$P_{гыз}^m(t) = P^j(x^{++}, t) = P^i(x^+, t), \quad j \in V_m^+, \quad i \in V_m^-, \quad (12)$$

$$\sum_{j \in V_m^+} ((G^j(x^{++}, t))^+ \cdot T^j(x^{++}, t)) + \sum_{i \in V_m^-} ((G^i(x^+, t))^- \cdot T^i(x^+, t)) =$$

$$= T_{cep}^m(t) \cdot \left(\sum_{j \in V_m^+} (G^j(x^{++}, t))^+ + \sum_{i \in V_m^-} (G^i(x^+, t))^- \right), \quad (13)$$

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

$$T^i(x^+, t) = T_{cep}^m(t), \text{ якщо } G^i(x^+, t) > 0, i \in V_m^-, m \in V_2 \cup V_4 \cup V_5 \cup V_6 \cup V_7 \cup V_8 \cup V_9,$$

де (далі індекс i відповідності змінної з цим індексом кожному i -му об'єкту моделювання для зручності опущено) $\alpha = \alpha(P, T) = \frac{z(P, T) g R}{S}$, $\beta = \beta(P, T) = \frac{\lambda \alpha(P, T)}{2D}$,

$$\gamma = \gamma(P, T) = \frac{C_p}{C_p - z(P, T) g R}; W(x, t), P(x, t), T(x, t) - \text{питома масова витрата (кг/с} \cdot \text{м}^2\text{),}$$

тиск ($Па$) і температура ($К$) газу; x – просторова координата уздовж геометричної осі ДТ ($м$); t – часова координата ($с$); T_{zp} – температура ґрунту ($К$); λ – коефіцієнт гідравлічного опору; D – діаметр труби ($м$); h – глибина залягання труби ($м$); K – коефіцієнт теплопередачі від труби до ґрунту ($Дж/м^3 \cdot с \cdot К$); C_p – питома теплоємність газу ($Дж/кг \cdot К$); g – прискорення вільного падіння ($м/с^2$); R – газова стала; $z(P, T)$ – коефіцієнт стисливості газу; S – площа поперечного перерізу труби ($м^2$); D_j – коефіцієнт Джоуля-Томсона ($К/Па$); $\varepsilon = \varepsilon(P(x^+, t), T(x^+, t), G(x^+, t))$ – ступінь стиснення газу ГПА; $m = m(P(x^+, t), T(x^+, t), G(x^+, t))$ – показник політропи; ΔP – значення падіння тиску газу при проходженні АПО ($Па$); Δ – відносна густина газу по повітрю; $Q = Q(P(x^+, t), T(x^+, t), T(x^{++}, t), G(x^+, t))$ – кількість переданого тепла ($ккал/час$); $C_{p,2}$ – коефіцієнт теплоємності газу ($Дж/кг \cdot К$); $\rho_{в.см}$ – густина повітря при стандартних умовах ($кг/м^3$); $F_{K_{KP}}$ – площа перерізу труби за запірною арматурою ($м^2$); ζ – сумарний коефіцієнт опору; $G(x, t) = W(x, t) \cdot S$ – масова витрата газу ($кг/с$); x^+, x^{++} – початок і кінець відповідної дуги; V_m^+, V_m^- – множина дуг, які входять і виходять з m -го вузла графа відповідно; $P_{вуз}^m(t)$ – тиск газу ($Па$) у вузлі з'єднання декількох технологічних об'єктів ГТС, який відповідає m -му проміжному вузлу графа; $T_{cep}^m(t)$ – середня температура ($К$), з якою газ витікає з вузла з'єднання декількох технологічних об'єктів ГТС (вузол відповідає m -му проміжному вузлу графа).

Система (1) – (13) включає в себе визначені на графі структури ГТС взаємопов'язані системи квазілінійних диференціальних рівнянь гіперболічного типу у частинних похідних (1) – (3), що відповідають режимам течії газу по кожній ДТ; системи функціональних рівнянь (4), (5), (10), що відповідають режимам роботи кожного ГПА (групі паралельно працюючих ГПА, якщо використовуються узагальнені характеристики основних параметрів нагнітачів ГПА відразу для декількох ГПА); системи функціональних рівнянь (6), (7), (10), що відповідають

режимам роботи кожного АПО (установці охолодження газу, що складається з декількох АПО, які працюють паралельно); системи нелінійних рівнянь (8), (9), (10), що відповідають режимам роботи кожної запірної арматури, які пов'язані між собою системами нелінійних алгебраїчних рівнянь (11) – (13), які відповідають умовам узгодження параметрів газового потоку в проміжних вузлах графа ГТС.

Функції $W^i(x, t)$, $P^i(x, t)$, $T^i(x, t)$, ($i \in M_1$) задано в двовимірній просторово-часовій області $\Omega_i = \{(x, t) : 0 \leq x \leq L_i, 0 \leq t \leq T\}$, де L_i – довжина відповідної i -ї ДТ, T – період часу, для якого проводяться розрахунки. Вважатимемо, що ці функції неперервно-диференційовані в заданій області за змінними x та t .

На додаток до основних рівнянь моделі (1) – (13) задаються граничні і початкові умови, що задають значення змінних на межі області, яка розглядається, для будь-якого моменту часу і в початковий момент часу в кожній просторовій координаті кожної ДТ, відповідно.

Нехай m – номер вузла, в якому задається гранична умова першого роду. Тоді вважаємо, що для m -го вузла ($m \in V_1 \cup V_3$) задана гранична умова

$$1\text{-го типу, якщо: } P_{\text{вуз}}^m(t) = P^m(t), \quad (14)$$

$$2\text{-го типу, якщо: } G_{\text{вуз}}^m(t) = G^m(t), \quad (15)$$

$$3\text{-го типу, якщо: } T_{\text{вуз}}^m(t) = T^m(t), \quad (16)$$

де $P_{\text{вуз}}^m(t)$, $G_{\text{вуз}}^m(t)$, $T_{\text{вуз}}^m(t)$ – тиск, масова витрата і температура газу в m -му вузлі; $P^m(t)$, $G^m(t)$, $T^m(t)$ – задані функції.

Початкова умова для розрахунку нестационарних неізотермічних режимів роботи ГТС визначається завданням розподілу питомих масових витрат, тисків і температур в початковий момент часу для всіх ДТ і має такий вигляд:

$$W^i(x, 0) = W_0^i(x), \quad P^i(x, 0) = P_0^i(x), \quad T^i(x, 0) = T_0^i(x), \quad (17)$$

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

Побудована модель дозволяє моделювати як штатні, так і позаштатні режими роботи ГТС, пов'язані, крім іншого, з нерівномірним добовим споживанням газу, переходом з одного режиму роботи ГТС на інший, відключенням/підключенням крупного споживача. Моделювання таких режимів пов'язане з плавною або різкою зміною граничних умов у вузлі, що є входом або виходом ГТС (у тому числі, місцем відключення/підключення крупного споживача), що не впливає на структуру розрахункового графа, який задає структуру ГТС. Зокрема, у вузлах входів ($m \in V_1$) і виходів ($m \in V_3$) ГТС задається гранична умова 1-го типу (14) або 2-го типу (15), причому на входах також задається гранична умова 3-го типу (16).

Також ця модель дозволяє моделювати режими роботи ГТС, пов'язані зі зміною режимів роботи КС, які суттєво впливають на перепад тиску і температури газу як на виході КС, так і по всій ГТС.

Математична модель нестационарних неізотермічних режимів роботи ГТС з урахуванням роботи САУ КЦ. Щоб моделювати роботу САУ КЦ було запропоновано задавати граничні умови не тільки в зовнішніх (входи і виходи ГТС), але і в проміжних вузлах графа G , що є виходами КЦ, оснащених САУ КЦ (виходи КЦ збігаються з виходами АПО (установки охолодження газу)). Для цього початкову модель нестационарних неізотермічних режимів роботи ГТС (1) – (13) було удосконалено.

Оскільки деякі КЦ мають САУ КЦ, то розіб'ємо кожну з множин M_2 і M_3 на дві непересічних підмножини. Нехай $M_2 = M_{21} \cup M_{22}$, $M_3 = M_{31} \cup M_{32}$, де M_{21} – множина дуг, що відповідають ГПА, які входять до КЦ, не оснащених САУ КЦ; M_{22} – множина дуг, що відповідають ГПА, які входять до КЦ, оснащених САУ КЦ; M_{31} – множина дуг, що відповідають АПО, які входять до КЦ, не оснащених САУ КЦ; M_{32} – множина дуг, що відповідають АПО, які входять до КЦ, оснащених САУ КЦ. Видалимо в початковому графі з M_2 множину дуг, що належать M_{22} , а з M_3 – множину дуг, що належать M_{32} . При цьому видаляються також з множин вузлів V_5 і V_6 множини вузлів, які відповідають виходам ГПА з M_{22} і входам АПО з M_{32} відповідно. Вважатимемо, що КЦ має один вхідний і один вихідний трубопровідний колектор, тоді КЦ з САУ КЦ замінюємо на графі однією дугою, початок якої належатиме V_4 (входи ГПА, що належать вхідному колектору), а кінець – V_{72} (виходи АПО, що належать вихідному колектору). Позначимо цю множину дуг \hat{M}_{22} . Тут $V_7 = V_{71} \cup V_{72}$, де V_{71} – множина вузлів, що відповідають виходам КЦ, не оснащених САУ КЦ, V_{72} – множина вузлів, що відповідають виходам КЦ, оснащених САУ КЦ. Позначимо \hat{M}_{21} множину дуг, що відповідають КЦ, не оснащених САУ КЦ, а $\hat{M}_2 = \hat{M}_{21} \cup \hat{M}_{22}$ – множину всіх дуг, що відповідають КЦ.

Тоді основні рівняння (1) – (13) математичної моделі запишемо так. Рівняння (1) – (3), (8) – (9), (11) залишаться без змін, (4) – (5) запишуться для $i \in M_{21}$, (6) – (7) запишуться для $i \in M_{31}$, (10) запишеться для $i \in M_{21} \cup M_{31} \cup \hat{M}_{22} \cup M_4$, (12) – (13) запишуться для $m \in V_2 \cup V_4 \cup V_5 \cup V_6 \cup V_{71} \cup V_8 \cup V_9$.

Задаються також початкові (17) і граничні умови. У зовнішніх вузлах ($m \in V_1 \cup V_3$) задаються граничні умови способом, аналогічним описаному в попередній моделі, а в m -му проміжному вузлі, що є виходом i -го КЦ, оснащеного САУ КЦ ($i \in \hat{M}_{22}$), граничні умови задаються у такий спосіб:

$$\begin{cases} P_{\text{вуз}}^m(t) = P_{\text{см}}^m(t), \\ T_{\text{вуз}}^m(t) = T_{\text{см}}^m(t), \quad m \in V_{72}, \end{cases} \quad (18)$$

де $P_{cm}^m(t)$, $T_{cm}^m(t)$ – тиск і температура газу, що стабілізуються на виході КЦ в період перепланування режиму.

Тобто задаються граничні умови 1-го і 3-го типів, що моделюють ситуацію роботи на КЦ засобів локальної автоматики, які дозволяють підтримувати тиск і температуру газу на виході з КЦ в заданому режимі.

У розділі описано також *математичну модель нестационарних неізотермічних режимів роботи ГТС, пов'язаних з аварійним відключенням КС/КЦ*, яка характеризується внесенням змін в структуру розрахункового графа ГТС, а математичне моделювання режимів роботи ГТС при аварійному відключенні КЦ зводиться до розгляду послідовності двох описаних вище математичних моделей, заданих на графі ГТС, тобто до вирішення взаємопов'язаних систем диференціальних рівнянь в частинних похідних гіперболічного типу із заданими початковими і граничними умовами, які можуть бути задані як в зовнішніх вузлах графа мережі, так і в зовнішніх і в проміжних.

У третьому розділі розглянуто чисельні методи розв'язання систем рівнянь математичних моделей та розрахунку нестационарних неізотермічних режимів роботи ГТС, пов'язаних з аварійним відключенням КС/КЦ.

Метод розв'язання системи рівнянь математичної моделі нестационарних неізотермічних режимів роботи ГТС. При розв'язанні системи рівнянь побудованої математичної моделі нестационарних неізотермічних режимів роботи ГТС для урахування в розрахунках таких технологічних елементів як КС (або КЦ не оснащені САУ КЦ), що складаються з ГПА (групи ГПА) і АПО (установки охолодження газу), автором вперше був запропонований чисельний метод, який дозволяє включити функціональні рівняння математичних моделей режимів роботи ГПА (активних елементів) і АПО в загальну модель, а також розв'язати отриману систему рівнянь.

Для розв'язання системи рівнянь математичної моделі 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 ДТ, множину функцій $\{G^i(x^+, t), P^i(x^+, t), T^i(x^+, t), G^i(x^{++}, t), P^i(x^{++}, t), T^i(x^{++}, t), t \in [0, T]\}_{i \in M_2 \cup M_3 \cup M_4}$ для ГПА, АПО та запірної арматури, і множину функцій $\{P_{вуз}^m(t), T_{сер}^m(t)\}_{m \in V_2 \cup V_4 \cup V_5 \cup V_6 \cup V_7 \cup V_8 \cup V_9}$ для проміжних вузлів. Ця сукупність функцій є розв'язком моделі (1) – (13) з граничними умовами (14) або (15), і (16) для всіх m -х вузлів ($m \in V_1$) та граничними умовами (14) або (15) для всіх m -х вузлів ($m \in V_3$) і початковими умовами (17).

Врахуємо також, що виходячи з фізичного змісту змінних $W^i(x, t)$, $P^i(x, t)$, $T^i(x, t)$, область визначення системи (1) – (3) при фіксованому i ($i \in M_1$) має вигляд $\overline{\Omega}_i = \{(x, t, W^i, P^i, T^i): 0 \leq x \leq L_i, 0 \leq t \leq T, P^i(x, t) > 0, T^i(x, t) > 0, \text{ де } W^i(x, t), P^i(x, t), T^i(x, t) \in C^{(1,1)}([0, L_i] \times [0, T])\}$, в рівнянні (5) $m_i > 1$, в рівнянні (7) $G^i(x^{++}, t) > 0$,

$t \in [0, T]$, в рівнянні (8) $P^i(x^{++}, t) > 0$, $t \in [0, T]$. Таким чином, виходячи з теоретичних засад теорії газової динаміки, слід очікувати існування гладкого розв'язку задачі в позначеній області $\overline{\Omega}_i$. Розв'язання системи рівнянь математичної моделі в роботі пропонується виконувати методом скінченних різниць. Просторово-часову область Ω_i розбиваємо скінченно-різницевою сіткою $\Omega_{\Delta x, \Delta t}^i = \{x_n = n\Delta x_i, n = \overline{0, N_i}, t^k = k\Delta t, k = \overline{0, N_t}, N_t = [T/\Delta t]\}$ з просторовим кроком $\Delta x_i = L_i/N_i$ по кожній i -й ($i \in M_1$) ДТ та з часовим кроком $\Delta t = T/M_t$. Апроксимація рівнянь (1) – (3) проводиться з використанням неявної скінченно-різницевої схеми, визначеної на чотирьохточковому шаблоні з різницеvim оператором другого порядку апроксимації за просторовою змінною і першого порядку за часовою змінною. У рівняннях (4) – (13) неперервні функції замінюються функціями у вузлах скінченно-різницевої сітки. Після заміни частинних похідних в системі диференціальних рівнянь для всіх ДТ та переходу від безперервних змінних до дискретних, отримуємо систему нелінійних алгебраїчних рівнянь, яка є дискретним аналогом початкової системи рівнянь. Далі за допомогою умов узгодження в вузлах графа, які є входами і виходами ГПА і АПО, та рівнянь (4) – (7), (10) відповідно до структури графа ГТС будується математична модель режимів роботи КЦ. У свою чергу, спільний розрахунок нестационарних неізотермічних режимів течії газу через i -й КЦ ($i \in \hat{M}_{21}$) і прилеглі до нього j -ту і l -ту ДТ (в КЦ може входити одна j -та і виходити одна l -та ДТ) пропонується здійснювати у такий спосіб. Рівняння, що відповідають рівнянням по «тиску» (2) і «температурі» (3) для 0-ї точки ДТ, що знаходиться за КЦ, замінюються на рівняння для «тиску» і «температури» з моделі режимів роботи КЦ, а рівняння по питомій масовій витраті залишається незмінним.

Також на цьому етапі розв'язання системи рівнянь частина змінних за допомогою умов узгодження вилучаються з системи, а саме множини функцій $\{G^i(x^+, t), P^i(x^+, t), T^i(x^+, t), G^i(x^{++}, t), P^i(x^{++}, t), T^i(x^{++}, t)\}_{i \in M_2 \cup M_3 \cup M_4}$ та $\{P_{\text{вуз}}^m(t)\}_{m \in V_2 \cup V_4 \cup V_5 \cup V_6 \cup V_7 \cup V_8 \cup V_9}$, після чого залишаються тільки змінні по ДТ у вузлах сітки $\Omega_{\Delta x, \Delta t}^i$ та множини функцій $\{T_{\text{сеп}}^m(k\Delta t)\}_{m \in V_2}$. Будемо шукати 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 $\{T_{\text{сеп}}^{m,k}, k = \overline{1, M_t}\}_{m \in V_2}$ для проміжних вузлів з V_2 . Далі розв'язання нелінійної системи, доповненої рівняннями, що описують початкові і граничні умови, здійснюється методом Ньютона. При цьому на кожному кроці методу Ньютона при знаходженні похідних для функціональних рівнянь, що описують режими роботи КЦ, функції ε_i , m_i , Q_i вважаються сталими, а в лінійних рівняннях значення функцій пропонується брати з попередньої ітерації методу Ньютона. Отримана на кожному кроці методу Ньютона лінійна система

перетворюється для того, щоб спростити і істотно зменшити її розмірність та забезпечити її розв'язання в алгебраїчному сенсі. А саме, частина змінних за допомогою умов узгодження вилучається із системи лінійних рівнянь. Для проміжних вузлів, які відповідають з'єднанню декількох ДТ, вилучається з системи рівнянь змінна по питомій масовій витраті і всі змінні по тиску, крім однієї.

Для урахування рівнянь, що відповідають режимам роботи i -го КЦ ($i \in \hat{M}_{21}$) необхідно змінну по витраті вилучити із системи з урахуванням умов узгодження, що відповідають КЦ. При цьому рівняння для питомої масової витрати для кінцевої точки розбиття N_j j -ї ДТ і початкової 0 -ї точки розбиття l -ї ДТ складаємо.

Отримана після низки перетворень і спрощень, які докладно наведені в роботі, лінійна система рівнянь розв'язується відносно векторів поправок до невідомих методом Гауса з вибором головного елемента. На кожному s -му кроці ітераційного процесу після знаходження параметрів газового потоку обчислюється середня температура газу $T_{сер}^{m,k,s}$ в проміжних вузлах графа ГТС ($m \in V_2$) і корегуються змінні по температурі в залежності від знаку питомих витрат відповідно до співвідношення (13). Також за допомогою умов узгодження знаходяться значення невідомих, видалених раніше із системи рівнянь.

Була досліджена поведінка запропонованого чисельного методу, зокрема, було досліджено порядок апроксимації, стійкість та збіжність скінченно-різницевої схеми. Показано, що використана для рівнянь, які описують режими течії газу по ДТ, неявна скінченно-різницева схема, визначена на чотирьохточковому шаблоні, є абсолютно стійкою і апроксимує диференціальну задачу з першим порядком апроксимації за часовою змінною і другим порядком за просторовою, отже розв'язок за допомогою цієї скінченно-різницевої схеми збігається до розв'язку диференціальної задачі з тим же порядком.

Метод розв'язання системи рівнянь математичної моделі режимів роботи ГТС з урахуванням роботи САУ КЦ. Для розв'язання системи рівнянь цієї моделі був взятий за основу описаний вище метод розв'язання системи рівнянь математичної моделі нестационарних неізотермічних режимів роботи ГТС складної структури з багатонитковими ЛД та КС. Однак для того, щоб врахувати можливість задавати граничні умови в проміжних вузлах графа ($m \in V_{72}$), що відповідають виходу i -го КЦ, обладнаного САУ КЦ ($i \in \hat{M}_{22}$), початковий метод розв'язання відповідної системи рівнянь було змінено і запропоновано таке перетворення.

Побудова та розв'язання системи рівнянь проводиться як і раніше. Розглянемо докладніше отриману систему лінійних рівнянь, а саме її частину, що описує спільний розрахунок нестационарних неізотермічних режимів течії газу через i -й КЦ ($i \in \hat{M}_{22}$), обладнаний САУ КЦ, і прилеглі до нього j -ту і l -ту ДТ. Згідно моделі, на виході КЦ необхідно задати граничні умови (18). Оскільки вихід КЦ збігається з початком ДТ, що знаходиться за КЦ, то, відповідно до умов узгодження, граничні умови необхідно задати в 0 -й точці l -ї ДТ, що знаходиться за i -м КЦ. А саме, значення, отримані з граничних умов (18) на кожному k -му часовому шарі, на 0 -й ітерації методу Ньютона присвоюються змінним $P_0^{k,0,l}$ і $T_0^{k,0,l}$, при цьому

рівняння, що відповідають тиску і температурі в цій точці, замінюються в загальній системі лінійних рівнянь такими рівняннями: $\delta P_0^{k,s,l} = 0$, $\delta T_0^{k,s,l} = 0$, де $\delta P_0^{k,s,l}$, $\delta T_0^{k,s,l}$ – вектори поправок до відповідних невідомих на k -му часовому шарі, s -й ітерації в 0-й точці простору для l -ї ДТ. Далі отримана система лінійних рівнянь розв'язується способом, який докладно описано в попередньому випадку.

Метод розрахунку режимів роботи ГТС, пов'язаних з аварійним відключенням КС/КЦ, заснований на методах розв'язання систем рівнянь попередніх двох моделей. Алгоритм моделювання ситуацій, пов'язаних з аварійним відключенням КС/КЦ, наведений у дисертаційній роботі.

У четвертому розділі проведено аналіз впливу ефекту Джоуля-Томсона на режими течії газу по ДТ, визначено область застосування запропонованої удосконаленої моделі нестационарних неізотермічних режимів течії газу по ДТ, яка враховує даний ефект. Розглянуто приклади розв'язання задач математичного моделювання нестационарних неізотермічних режимів роботи ГТС запропонованими методами.

У тому числі було розглянуто результати розрахунку нестационарних неізотермічних режимів роботи ГТС, пов'язаних з роботою САУ КЦ.

Розглядався магістральний газопровід ШБКБ. Видобутий на Шебелинському газоконденсатному родовищі газ, після компримування на Червонодонецькій дотискувальній КС подається газопроводом ШБКБ на газорозподільну станцію-5 (на теплоелектроцентральному ТЕЦ-5) м. Харкова. Метою даного дослідження було моделювання перехідних режимів роботи магістрального газопроводу ШБКБ для перевірки гіпотези щодо можливості зниження вихідного тиску газу на Червонодонецькій дотискувальній КС або повного її відключення і подачі низьконапірного газу (у разі відключення КС – некомпримованого з пластовим тиском) з Шебелинського газоконденсатного родовища на ТЕЦ-5 при заданій структурі газопроводу з урахуванням технологічних обмежень на мінімально-допустимий тиск на вході ТЕЦ-5.

За початковий розподіл параметрів газу (17) був узятий стаціонарний режим роботи газопроводу, розрахований на підставі отриманих даних натурних вимірів наявного режиму роботи газопроводу. На входах магістрального газопроводу задавалися граничні умови 1-го і 3-го типів ((14), (16)), на виходах – 2-го типу (15). Оскільки на Червонодонецькій дотискувальній КС стоїть САУ КЦ, то і в проміжному вузлі, що є виходом КС, задавалися граничні умови (18).

Для такого режиму роботи магістрального газопроводу було проведено низку експериментів з моделювання перехідних режимів, пов'язаних зі зниженням тиску газу на виході Червонодонецької дотискувальної КС і повним її відключенням, результати яких детально наведено в дисертаційній роботі. Проведений аналіз перехідних процесів дозволяє зробити висновок щодо неможливості сильного зниження вихідного тиску газу на Червонодонецькій дотискувальній КС і, як наслідок, повного її відключення, оскільки при наявних режимах роботи газопроводу (тиску і об'ємі газу, що подається) та схемі подачі газу тиск на ТЕЦ-5 (навіть при середньому навантаженні) стає аварійним і критично низьким для стабільної та безаварійної роботи, а отриманий режим роботи магістрального

газопроводу ставить під загрозу надійну експлуатацію газопроводу і газорозподільних станцій і, як наслідок, безперебійне газопостачання споживачів газу.

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

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі, для підвищення якості та ефективності оперативно-диспетчерського управління ГТС України, вирішена задача математичного моделювання штатних та позаштатних нестационарних неізотермічних режимів роботи ГТС складної структури з багатонитковими ЛД та КС. Отримані результати мають важливе наукове і практичне значення, зокрема, дозволяють відстежувати і контролювати динаміку зміни параметрів газових потоків в ГТС, описувати, прогнозувати і вчасно запобігати аварійним ситуаціям (в тому числі і на КС), що дозволяє виробити у персоналу диспетчерського управління навички дій при виникненні реальних аварій та ефективно управляти системою в тій або іншій небезпечній ситуації.

Виконані теоретичні та експериментальні дослідження дозволили дійти таких висновків.

1. Удосконалена шляхом урахування в рівнянні енергії ефекту Джоуля-Томсона математична модель нестационарних неізотермічних режимів течії газу по ДТ, що являє собою систему квазілінійних диференціальних рівнянь гіперболічного типу у частинних похідних, дозволила більш адекватно описувати температурні та гідравлічні режими транспорту та розподілу газу як по ДТ, так і по ГТС.

2. Удосконалені існуючі математичні моделі нестационарних неізотермічних режимів роботи ГТС з багатонитковими ЛД та КС шляхом внесення в модель функціональних рівнянь, які описують режими роботи активних елементів – КС, що складаються з ГПА і АВО, дозволили моделювати керуючий вплив на режими роботи ГТС і адекватно і більш повно описувати технологічні схеми та режими роботи ГТС.

3. Вперше запропонований чисельний метод розрахунку нестационарних неізотермічних режимів роботи ГТС з багатонитковими ЛД та КС дозволив зменшити розмірність лінійної системи, збільшити точність розрахунків і проводити спільний розрахунок режимів роботи КС і ДТ. Метод відрізняється від відомих способом урахування функціональних рівнянь, які описують режими роботи активних елементів (КС), при розв'язанні нелінійної системи рівнянь, а також способом розв'язання лінійної системи рівнянь, отриманої на кожному кроці методу Ньютона.

4. Удосконалена шляхом урахування можливості задання граничних умов у проміжних вузлах (виходи КЦ) графа мережі, що описує структуру ГТС, математична модель нестационарних неізотермічних режимів роботи ГТС з багатонитковими ЛД та КС та запропонований чисельний метод розв'язання отриманої системи рівнянь дозволили розширити можливості моделювання роботи КЦ та застосовувати запропоновані модель та метод для розрахунків нестационарних неізотермічних режимів роботи ГТС у випадках, коли працюють САУ КЦ.

5. Запропоновані математичні моделі і методи розрахунку нестационарних неізотермічних режимів роботи ГТС дозволили описувати і прогнозувати динаміку зміни параметрів газових потоків в ГТС, що дало можливість оцінювати і аналізувати ситуацію, яка склалась на ГТС, і, на підставі цього, ухвалювати рішення, що дозволяють забезпечувати нормальну роботу ГТС і максимально знизити ризик виникнення аварійних ситуацій, в тому числі і на КС.

6. Порівняння отриманих результатів моделювання режимів роботи магістрального газопроводу ШБКБ з реальними даними дозволило зробити висновок щодо адекватності запропонованих математичної моделі та методу розрахунку нестационарних неізотермічних режимів роботи ГТС. Так порівняння розрахункових значень тиску газу і натурних вимірювань, отриманих за допомогою системи моніторингу оперативних даних, показали, що похибка розрахункових даних не перевищує реальної похибки датчиків тиску, яка становить $\pm 0,5\%$ (0,5 атм), а похибка розрахункових значень по витраті газу через Червонодонську дотискувальну КС не перевищує похибки витратомірів, яка складає 2,3 – 2,5 %, що задовольняє вимогам, які висуваються диспетчерськими службами щодо точності розрахункових комплексів.

7. Отримані результати можуть бути використані для оперативно-диспетчерського управління складними трубопровідними системами, що дозволить ефективно управляти ГТС, підтримувати стабільний і безпечний режим її роботи і тим самим забезпечити виконання ГТС її функціонального призначення.

Результати досліджень дисертаційної роботи впроваджено у філії «Науково-дослідний і проектний інститут транспорту газу» (Інститут транспорту газу) ДК «Укртрансгаз» НАК «Нафтогаз України» та у навчальний процес у Харківському національному університеті радіоелектроніки.

ПЕРЕЛІК РОБІТ, ОПУБЛІКОВАНИХ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

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

2. Тевяшев А. Д. Учет эффекта Джоуля-Томсона в тепловых расчетах для участка магистрального газопровода / А. Д. Тевяшев, И. Г. Гусарова, Ю. В. Буданцева (Боярская) // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2006. – 2/3 (20). – С. 57–61.

3. Боярская Ю. В. Учет работы аппарата воздушного охлаждения при математическом моделировании нестационарных режимов транспорта природного газа по многониточному магистральному газопроводу / Ю. В. Боярская // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2009. – 3/3 (39). – С. 44–51.

4. Гусарова И. Г. Классы задач математического моделирования и численного анализа нестационарных режимов работы газотранспортной системы / И. Г. Гусарова, Ю. В. Боярская // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2010. – 3/6 (45). – С. 26–33.

5. Буданцева (Боярская) Ю. В. Численное моделирование неустановившихся режимов транспорта природного газа по многониточному магистральному газопроводу / Ю. В. Буданцева (Боярская), И. Г. Гусарова, А. Д. Тевяшев // Вісник Харківського національного університету. Серія «Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління». – 2008. – Вип. 10, № 833. – С. 59–72.

6. Тевяшев А. Д. Особенности численного моделирования нестационарных неизотермических режимов транспорта газа по фрагменту сети с активными элементами / А. Д. Тевяшев, И. Г. Гусарова, Ю. В. Буданцева (Боярская) // Проблеми нафтогазової промисловості : зб. наук. праць / Гол. ред. Д. О. Єгер. – К., 2007. – Вип. 5. – С. 446–452.

7. Боярская Ю. В. Компьютерное моделирование и анализ режимов работы региональной системы газоснабжения / Ю. В. Боярская, И. Г. Гусарова // Радиоэлектроника и информатика. – 2011. – № 3 (54). – С. 54–59.

8. Тевяшев А. Д. Математическое моделирование и численный анализ нестационарных неизотермических режимов работы газотранспортных систем / А. Д. Тевяшев, И. Г. Гусарова, Ю. В. Боярская // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики : сборник статей / Отв. ред. Н. И. Воропай, А. Д. Тевяшев. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2011. – Вып. 61. Проблемы исследования и обеспечения надежности либерализованных систем энергетики. – С. 405–413.

9. Чуркина А. В. Математическое обеспечение системы информационной поддержки процессов принятия решений по управлению режимами работы в газотранспортной сети / А. В. Чуркина, Ю. В. Буданцева (Боярская) // Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке : 9-й международный молодежный форум, 19–21 апреля 2005 г., Харьков : сб. материалов форума. – Харьков: ХНУРЭ, 2005. – С. 333.

10. Буданцева (Боярская) Ю. В. Анализ тепловых расчетов участка магистрального газопровода / Ю. В. Буданцева (Боярская), А. В. Чуркина // Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке : 10-й юбилейный международный молодежный форум, 10–12 апреля 2006 г., Харьков : сб. материалов форума. – Харьков: ХНУРЭ, 2006. – С. 534.

11. Гусарова И. Г. Математическое моделирование работы аппарата воздушного охлаждения при расчете нестационарных неизотермических режимов транспорта газа / И. Г. Гусарова, Ю. В. Буданцева (Боярская) // Информационные компьютерные технологии и системы : международная конференция 3-го Международного радиоэлектронного форума «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» МРФ-2008, 22–24 октября 2008 г., Харьков. Т. 5. : сб. научных трудов. – Харьков: АНПРЭ, ХНУРЭ, 2008. – С. 240–241.

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

13. Гусарова И. Г. Численный метод расчета нестационарных неизотермических режимов транспорта газа по фрагменту сети с активными элементами / И. Г. Гусарова, Ю. В. Буданцева (Боярская) // Глобальные информационные системы. Проблемы и тенденции развития : первая международная конференция, 3–6 октября 2006 г., Харьков-Туапсе : сб. материалов конференции. – Харьков: ХНУРЕ, 2006. – С.178–179.

14. Гусарова И. Г. Математическое моделирование последовательно работающего технологического оборудования / И. Г. Гусарова, Ю. В. Буданцева (Боярская) // Системний аналіз та інформаційні технології : ІХ міжнародна науково-технічна конференція, 15–19 травня 2007 р., Київ : зб. матеріалів конференції. – К.: НТУУ «КПІ», 2007. – С. 101.

15. Буданцева Ю. В. Аналіз результатів чисельного моделювання нестационарних неизотермічних режимів транспорту газу по однопітковому магістральному газопроводу / Ю. В. Буданцева (Боярская), І. Г. Гусарова // Одинадцята всеукраїнська (шоста міжнародна) студентська наукова конференція з прикладної математики та інформатики СНКПМІ-2008, 9–10 квітня 2008 р., Львів : тези доповідей. – Львів: ЛНУ, 2008. – С. 43–44.

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

17. Гусарова И. Г. Математическое моделирование системы автоматизированного управления компрессорным цехом при расчете неустановившихся режимов работы газотранспортной системы / И. Г. Гусарова, Ю. В. Боярская // Интеллектуальные системы принятия решений и проблемы вычислительного интеллекта : международная научная конференция, 17–21 мая 2010 г., Евпатория. Т. 1. : сб. научных трудов. – Херсон: ХНТУ, 2010. – С. 56–59.

18. Боярская Ю. В. Компьютерное моделирование режимов работы региональной системы газоснабжения / Ю. В. Боярская, И. Г. Гусарова // Информационные системы и технологии в энергетике и жилищно-коммунальной сфере : международная научно-техническая конференция, 1–6 октября 2011 г., Ялта : тезисы докладов. – Х.: НТМТ, 2011. – С. 37–39.

АНОТАЦІЯ

Боярська Ю. В. Математичне моделювання та чисельний аналіз нестационарних неизотермічних режимів роботи газотранспортних систем. – На правах рукопису.

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

Дисертаційна робота присвячена проблемі математичного моделювання нестационарних неізотермічних режимів роботи газотранспортної системи складної структури з багатонитковими лінійними ділянками та компресорними станціями.

У роботі вдосконалено модель нестационарних неізотермічних режимів течії газу по ділянці трубопроводу. Удосконалено математичні моделі нестационарних неізотермічних режимів роботи газотранспортної системи довільної структури з багатонитковими лінійними ділянками та компресорними станціями. Розроблено чисельні методи розв'язання систем рівнянь запропонованих математичних моделей, що дозволило розраховувати штатні та позаштатні нестационарні неізотермічні режими роботи газотранспортної системи складної структури, пов'язані, крім іншого, з нерівномірним добовим споживанням газу, переходом з одного режиму роботи газотранспортної системи на інший, відключенням/підключенням крупного споживача, зміною режимів роботи та аварії на компресорних станціях/цехах, а також роботою систем автоматичного управління компресорними цехами. Результати дисертаційної роботи дозволяють із заданим ступенем точності моделювати несталі режими роботи газотранспортної системи, відстежувати динаміку зміни параметрів газових потоків (тиску, витрати і температури газу) в газотранспортній системі, прогнозувати і вчасно запобігати аварійним ситуаціям.

Ключові слова: математичне моделювання, нестационарні неізотермічні режими роботи, газотранспортна система, ділянка трубопроводу, компресорна станція, газоперекачувальний агрегат, апарат повітряного охолодження, диференціальні рівняння, метод скінчених різниць.

АННОТАЦІЯ

Боярская Ю. В. Математическое моделирование и численный анализ нестационарных неізотерміческих режимов работы газотранспортных систем. – На правах рукописи.

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

Диссертационная работа посвящена проблеме математического моделирования нестационарных неізотерміческих режимов работы газотранспортной системы произвольной структуры с многониточными линейными участками и компрессорными станциями.

В работе проведен анализ современного состояния газотранспортной системы, особенностей ее структуры и режимов работы, что позволило обосновать актуальность темы диссертационной работы и определить цель и задачи исследования.

Анализ существующих математических моделей, используемых для описания режимов работы основных объектов газотранспортной системы, и численных методов расчета нестационарных неізотерміческих режимов работы газотранспортной системы произвольной структуры позволил обосновать необходимость реализации новых моделей и методов расчета данных режимов,

позволяющих, во-первых, моделировать совместную работу компрессорных станций и участков трубопровода; во-вторых, с большей точностью и степенью адекватности рассчитывать не только номинальные, но и аварийные режимы работы (в том числе и на компрессорных станциях).

Усовершенствована модель нестационарных неизотермических режимов течения газа по участку трубопровода, что позволило за счет учета эффекта Джоуля-Томсона более адекватно описывать температурный и гидравлический режимы транспорта и распределения газа как по участку трубопровода, так и по всей газотранспортной системе.

Построены математические модели нестационарных неизотермических режимов работы газотранспортной системы сложной структуры с многониточными линейными участками и компрессорными станциями, позволяющие моделировать различные режимы работы газотранспортной системы, как штатные, так и нештатные, в том числе неравномерное суточное потребление газа, переход с одного режима работы газотранспортной системы на другой, отключение/подключение крупного потребителя, изменение режимов работы и аварии на компрессорных станциях, а также работу систем автоматического управления компрессорными цехами.

Предложены численные методы решения систем уравнений построенных моделей. Впервые предложен метод решения системы уравнений построенной математической модели неустановившихся режимов работы газотранспортной системы сложной структуры, позволивший проводить совместный расчет режимов работы компрессорных станций и участков трубопровода.

Предложен численный метод, позволяющий задавать граничные условия в промежуточных узлах графа сети, описывающего структуру газотранспортной системы, и тем самым расширить возможности моделирования компрессорного цеха в случаях, когда работают системы автоматического управления компрессорными цехами.

Результаты диссертационной работы позволяют с заданной степенью точности моделировать нестационарные неизотермические режимы работы газотранспортной системы, отслеживать динамику изменения параметров газовых потоков (давления, расхода и температуры газа) в газотранспортной системе, прогнозировать и своевременно предупреждать аварийные ситуации.

Получены решения задач математического моделирования нестационарных неизотермических режимов работы газотранспортной системы, рассматриваемых в работе. Адекватность предложенных математических моделей и методов подтверждена вычислительными экспериментами. В частности, сравнивались с реальными данными результаты моделирования режимов работы магистрального газопровода Шебелинка – Белгород – Курск – Брянск. Результаты хорошо согласуются, что подтверждает достоверность полученных результатов и позволяет судить об адекватности предложенных математических моделей и численных методов расчета нестационарных неизотермических режимов работы газотранспортной системы.

Полученные в диссертационной работе результаты могут быть использованы для диспетчерского управления сложными трубопроводными системами.

Ключевые слова: математическое моделирование, нестационарные неизотермические режимы работы, газотранспортная система, участок трубопровода, компрессорная станция, газоперекачивающий агрегат, аппарат воздушного охлаждения, дифференциальные уравнения, метод конечных разностей.

ABSTRACT

Boyarskaya Y. V. Mathematical modeling and numerical analysis of nonstationary nonisothermal modes of the gas transport systems. – As a manuscript.

The thesis to obtain the scientific degree of the Candidate of technical sciences according to the specialty 01.05.02 – mathematical modeling and computational approach. – Kharkov National University of Radio and Electronics of Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2013.

The thesis is dedicated to the problem of mathematical modeling of nonstationary nonisothermal operation modes of the gas transport system of complex structure with of multi-line linear sections and compressor stations.

In this paper the model of nonstationary nonisothermal flow mode of gas through the pipeline section has been improved. The mathematical models of nonstationary nonisothermal operation modes of the gas transport system of complex structure with multi-line linear section and compressor stations have been improved. The numerical methods for solving systems of equations of mathematical models have been developed. This allowed to calculate nonstationary nonisothermal operation modes of the gas transport system of complex structure caused by, among other things, the uneven daily gas consumption, switching from one mode of gas transport system to another, disconnecting/connecting of a large customer, changing modes of operation and the accident at compressor stations/workshops and the work of automatic control of compressor shops. The results of the thesis allows with the given degree of accuracy to simulate unsteady modes of gas transport system, monitor the dynamics of changes in gas flow parameters (pressure, flow and gas temperature) in the gas transport system, to predict and prevent emergency situation in a timely manner.

Keywords: mathematical modeling, nonstationary nonisothermal operating modes, gas transportation system, pipeline section, compressor station, gas compressor unit, air cooler, differential equations, finite difference method.

Відповідальний випусковий

В. В. Безкоровайний

Підп. до друку .10.2013. Формат 60×84 1/16. Спосіб друку – ризографія
Умов. друк. арк. 1,2. Ціна договірна. Тираж 100 прим.
Зам. № .

ХНУРЕ, 61166, Харків, просп. Леніна, 14

Віддруковано в навчально-науковому
видавничо-поліграфічному центрі ХНУРЕ
Харків, просп. Леніна, 14