

Міністерство освіти і науки України
Національний університет „Львівська політехніка”



ГЛАДУН СЕРГІЙ ВАЛЕНТИНОВИЧ

УДК 621.532.3.004.17:681.142:622.691.24:536.12

**МОДЕЛЮВАННЯ ТА РОЗРАХУНОК ОПТИМАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ РОБОТИ
ПІДЗЕМНОГО СХОВИЩА ГАЗУ В СИСТЕМІ МАГІСТРАЛЬНИХ ТРУБОПРОВІДІВ**

01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

ЛЬВІВ–2017

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Центрі математичного моделювання Інституту прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С.Підстригача НАН України

Науковий керівник : доктор технічних наук, старший науковий співробітник
П'янило Ярослав Данилович,
Центр математичного моделювання Інституту прикладних проблем
механіки і математики ім. Я.С.Підстригача НАН України, директор

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Лимарченко Олег Степанович,
Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
завідувач кафедри механіки суцільного середовища

доктор фізико-математичних наук, професор
Костробій Петро Петрович,
Національний університет “Львівська політехніка”,
завідувач кафедри прикладної математики

Захист відбудеться 11 травня 2017 р. о 14 год. на засіданні спеціалізованої вченої ради
Д 35.052.05 Національного університету „Львівська політехніка” (79013, Львів, вул. С.Бандери, 12,
корп. 11, ауд. 218).

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного університету „Львівська
політехніка” (79013, Львів, вул. Професорська, 1).

Автореферат розісланий 10 квітня 2017р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради,
доктор технічних наук, професор



Р.А.Бунь

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. На цей час у зв'язку з постійним зростанням цін на енергоносії, зменшенням їх видобутку і виробництва та постійною зміною умов транспортування й використання необхідно мати ефективні методи розрахунку як фізичних, так і економічних параметрів роботи енергетичних систем, зокрема і газотранспортних.

Для ефективного управління процесами масопереносу, які проходять в газотранспортних системах (ГТС), включаючи наземну частину, видобуток газу та підземні сховища газу (ПСГ), будують адекватні математичні моделі, які сприяють ефективному вирішенню ряду задач, які виникають у процесі транспорту газу: розрахунок оптимальних режимів газотранспортних систем; розрахунок оптимальних параметрів керування газопотоками в умовах неусталених газових потоків; розрахунок фільтрації газу в неоднорідних порових середовищах, тощо.

Режим роботи магістральних газопроводів і їх конкретних ділянок визначається і контролюється з урахуванням встановлених технічних обмежень робочих параметрів роботи обладнання та трубопроводів. Під час розробки режиму роботи магістральних газопроводів (МГ), диспетчерська служба підприємства повинна проводити гідравлічні розрахунки з урахуванням його технічного стану і графіка режиму роботи (місячним, кварталним, річним). У разі відхилення фактичного режиму від розрахункового, повинні бути прийняті заходи щодо відновлення розрахункового режиму. ГТС повинна експлуатуватися за умови оптимальних режимів або задаватися ДС межами допустимих значень тиску і температури газу, що призначаються з урахуванням фактичного технічного стану і умов експлуатації.

Диспетчерська служба повинна аналізувати і виявляти вузькі місця у системах газозабезпечення за підсумками роботи в зимовий період, розробляти пропозиції щодо їх усунення; приймати оперативні рішення про модифікації відбору або закачування газу в підземні сховища газу; приймати участь у розробці і здійсненні проектів і заходів з розвитку систем газопостачання, в тому числі направлених на підвищення надійності її роботи; оперативно управляти режимом роботи магістральних газопроводів і їх ділянок у межах підприємства тощо.

Газотранспортні системи складаються з великого числа технологічних об'єктів (десять тисяч), кожен з яких описується своєю математичною моделлю. Процеси, які проходять в таких системах, розгортаються на значних просторових і часових вимірах. Для побудови математичної моделі системи необхідно на основі певних фізичних законів або принципів ув'язати математичні моделі кожного з технологічних об'єктів (ТО). Слід ще врахувати і те, що математичні моделі багатьох ТО є емпіричні або напівемпіричні і при їх застосуванні необхідно постійно проводити процедуру адаптації. Як правило, всі математичні моделі відносяться до класу нелінійних із розподіленими чи зосередженими параметрами. Параметри моделей справедливі в певних просторово-часових проміжках та залежать від багатьох чинників.

У випадку моделювання роботи підземних сховищ газу необхідно знати параметри, які характеризують технічний стан об'єктів, особливо пласту, і є відомі достатньо наближено. Використання їх нормативних або довідкових значень допустиме тільки при оціночних розрахунках, а оперативне ж планування режимів роботи повинно проводитися із врахуванням реальних параметрів гідравлічного стану ТО. В процесі експлуатації технологічних об'єктів ці параметри значно відрізняються від нормативних. У зв'язку з цим необхідно уточнювати їх шляхом розв'язання обернених коефіцієнтних задач.

При моделюванні роботи газотранспортних систем на цей час досліджувались або окремі технологічні об'єкти, або окремі підсистеми ГТС в спрощених варіантах і, в

основному, за стаціонарних умов руху газу. Зокрема, роботи ПСГ та МГ, як правило, досліджувались окремо. В свою чергу дослідження ПСГ зводилось до дослідження пласту. Разом з тим, оскільки робота МГ та ПСГ взаємозв'язана, то виникає необхідність в побудові та розрахунку параметрів сумісної роботи МГ та ПСГ.

Таким чином у теперішній час актуальною є загальна проблема розробки ефективних, простих у реалізації й достатньо універсальних аналітико-числових моделей фізичних процесів транспорту та зберігання газу у випадку сумісної роботи МГ та ПСГ, адаптивних методів розв'язування виникаючих задач математичної фізики і обробки експериментальних даних, які орієнтовані на використання апріорної інформації.

У цій роботі розроблено та досліджено аналітико-числові моделі руху газу в трубопроводах та природних пористих середовищах стосовно практичних проблем оптимізації процесів згідно критеріїв мінімізації енергетичних затрат. Побудовано моделі сумісної роботи МГ та ПСГ, що дають можливість оптимізувати режимні параметри, зокрема способи включення ПСГ в роботу МГ, розрахунку параметрів роботи КС для виконання поставлених задач. Уточнено існуючі або запропоновані нові аналітико-числові алгоритми та методи розв'язання поставлених задач. Одержані теоретичні результати апробовані в ході числових експериментів на базі заміряних даних.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалась у межах планових науково-дослідних робіт Центру математичного моделювання ІППММ ім.Я.С.Підстригача НАН України та ПАТ «Укртрансгаз», в яких автор був виконавцем.

Матеріали дослідження використовувались при розробці науково-дослідних робіт:

“Нестаціонарні задачі фільтрації газу в неоднорідних пористих середовищах в газовому і водонапірному режимах із зосередженими джерелами і стоками” (держ. реєстр. № 0107U000356);

„Розробка та дослідження математичних моделей процесів деформування та переносу в неоднорідних середовищах з урахуванням локальної структури та зосереджених джерел і стоків” (I кв. 2012 –IV кв. 2016);

“Розроблення математичних моделей, методів та алгоритмів для прогнозування і оптимального керування режимами експлуатації підземних сховищ газу. Побудова методів та алгоритмів для прогнозування і оптимального керування процесами відбору-закачування газу в підземні сховища” (держ. реєстр. № 0107U005812);

„Розроблення підсистеми оперативного планування динамічних режимів роботи магістральних газопроводів для автоматизованого диспетчерського керування потоками газу в газотранспортній системі України” (держ. реєстр. № 0110U004141);

“Математичне моделювання нестаціонарної фільтрації газу в неоднорідних пористих середовищах з рухомими границями розділу газ-вода ” Розділ 1 «Побудова математичної моделі та алгоритмів дослідження фільтрації газу та рідини в неоднорідних середовищах складної форми» до договору № 1 від 17 березня 2014 р. згідно з розпорядженням Президії НАН України від 05.03.2014 №142.

“Фізико-математичне моделювання та дослідження механічних і фільтраційно-дифузійних процесів у дрібнодисперсних середовищах з врахуванням хімічних перетворень і електромагнітних процесів” (держ. реєстр. № 0104U000202).

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є розробка та аналіз математичних моделей руху газу в трубопроводах і природних пористих середовищах та побудова математичної моделі для розрахунку оптимальних параметрів сумісної роботи підземних сховищ газу в системі магістральних трубопроводів, побудова методів та алгоритмів для розрахункових схем газотранспортних мереж.

Для досягнення цієї мети у дисертації були поставлені та вирішені такі основні завдання:

- дослідити математичні моделі масопереносу в газопроводах та пористих середовищах та вивчити вплив гідродинамічних параметрів газу та геометричних параметрів трубопроводів і пластів ПСГ на цей процес;
- сформулювати та досліджені задачі математичної фізики стосовно знаходження розподілу тиску, температури та масової швидкості газу в трубопроводах та пористих середовищах;
- розробити алгоритми і побудувати ітераційні схеми розв'язування нелінійних задач масопереносу та дифузії газу в пористих середовищах із зосередженими джерелами;
- дослідити ефективність способів збору газу при роботі ПСГ;
- побудувати методи та алгоритми для розрахункових схем газотранспортних мереж;
- дослідити ефективність та точність побудованих алгоритмів шляхом апробації результатів у практичних розрахунках на реальних даних.

Об'єктом дослідження є процеси поширення газу в трубопроводах, фільтрації газу в пористих середовищах та побудова математичної моделі сумісної роботи МГ і ПСГ.

Предметом дослідження є математичні моделі масопереносу в трубопроводах та пористих середовищах складної структури, розвиток підходів до побудови аналітико-числових моделей сумісної роботи МГ та ПСГ.

Методи дослідження. Рух газу в складних системах трубопровідного транспорту описується, як правило, нелінійними системами диференціальних рівнянь та нелінійними емпіричними і напівемпіричними співвідношеннями. Загальна методика розрахунку режимних параметрів полягає у застосуванні варіаційних та ітераційних методів до побудови та розв'язування поставлених задач математичної фізики. Для цього використано: теорію функціонального аналізу та диференціальних рівнянь для обґрунтування існування і єдиності розв'язку задач; теорію похибок та обробки експериментальних результатів для аналізу меж невизначеності та оцінки точності числових результатів, методи розв'язування задач математичної фізики. Застосовано об'єктно-орієнтований підхід до програмної реалізації алгоритмів.

Наукова новизна одержаних результатів. У роботі розв'язано завдання науково-технічного характеру в галузі математичного моделювання та обчислювальних методів – створення адаптивних чисельно-аналітичних моделей руху газу в трубопроводах, пористих середовищах та сумісної роботи МГ і ПСГ.

У процесі розв'язання вказаного завдання отримано такі нові результати:

- вперше сформульовано уточнені математичні моделі сумісної роботи МГ та ПСГ, які враховують газодинамічну ув'язку руху газу в трубопроводах та фільтрації газу в пластах підземних сховищ;
- вперше побудовано аналітичну модель збору газу при колекторному підключення свердловин до газозбірного пункту;
- створено нові гібридні чисельно-аналітичні ітераційні методи для розв'язування задач газової динаміки в системі ПСГ-МГ з метою їх використання для розрахунку режимних параметрів роботи цієї системи;
- обґрунтовано ефективність розвинених алгоритмів для моделювання процесів масопереносу в складних системах.

Практичне значення одержаних результатів. У роботі запропоновано чисельно-аналітичні моделі масопереносу в трубопроводах та фільтрації газу у підземних сховищах,

сумісної роботи системи ПСГ-МГ, а також методи їх дослідження. Отримані теоретичні результати дали змогу побудувати розрахункові схеми газотранспортних мереж, включаючи ПСГ, та отримати основні співвідношення, які дають можливість сформулювати рекомендації щодо оптимізації роботи системи.

Одержані в дисертаційній роботі результати дозволили:

- формувати режимні параметри роти системи ПСГ-МГ з метою оптимізації енергетичних затрат;
- оптимізувати роботу та приймати рішення системи пласт підземного сховища газу - газозбірний пункт, прогнозувати параметри процесів відбору-закачування газу. (використано в ДК “Укртрансгаз”);
- побудувати алгоритми для розрахунку параметрів поточкорозподілу газу в газотранспортній системі для прийняття адекватних управлінських рішень в умовах оперативних змін роботи системи.

Частина результатів теоретичного і практичного характеру використано при розробці спецкурсу “Математичне моделювання фізичних процесів” для студентів Львівського національного університету імені Івана Франка.

До дисертаційної роботи додані акти про використання результатів роботи на виробництві та в навчальному процесі.

Вірогідність отриманих результатів забезпечується строгістю постановок задач та строгістю їх числового моделювання. Отримані теоретичні результати апробовані в обчислювальних експериментах на модельних задачах. Оцінки точності та збіжності запропонованих методів і алгоритмів обґрунтовані як теоретично, так і в процесі проведення числових експериментів на експериментальних даних.

Особистий внесок здобувача. У роботах, опублікованих у співавторстві, автору дисертації належать: формулювання задачі, підготовка вхідної інформації та побудова алгоритму розрахунку – [1, 3, 6, 7], побудова алгоритму розрахунку та аналіз отриманих результатів – [4, 5]; підготовка вхідної інформації, проведення розрахунків та аналіз отриманих результатів – [8, 24]; підготовка вхідної інформації, проведення розрахунків та верифікація результатів – [10-12, 20, 21]; визначення режимних параметрів та побудова алгоритму розрахунку – [14]; аналіз моделей процесу масопереносу в технологічних об’єктах газотранспортних систем – [15]; формулювання задачі та критеріїв оптимізації – [9]; побудова алгоритму програмного комплексу та аналіз отриманих результатів – [13, 16, 18, 19, 22, 23]; побудова структурної схеми розрахунку режимних параметрів та верифікація отриманих результатів – [17]. В усіх опублікованих у співавторстві працях автору належать активна участь у постановці задач та в аналізі отриманих результатів.

Апробація результатів дисертації. Основні результати досліджень доповідалися на конференціях різного рівня, зокрема: 2-й Міжнародній науково-технічній конференції “Теория и практика разработки, промышленного внедрения компьютерных комплексов” (Москва, 2004); Всеукраїнській конференції „Интеллектуальные системы принятия решений та прикладні аспекти інформаційних технологій” (Євпаторія, 2005); 3-й Міжнародній науково-технічній конференції “Компьютерные технологии поддержки принятия решений в диспетчерском управлении газотранспортными и газодобывающими системами” (Москва, 2007); 3-й Міжнародній науково-технічній конференції „Комп’ютерні науки та інформаційні технології” (CSIT 2008) (Львів, 2008); Науково-технічній конференції “Информационные системы і технології в енергетиці і житлово-комунальній сфері” (Ялта, 2011); 5-й Міжнародній науково-технічній конференції “Компьютерные технологии поддержки принятия решений в диспетчерском управлении газотранспортными и газодобывающими

системами” (Москва, 2012); Науково-технічній конференції «Мікро- та нанонеоднорідні матеріали: моделі та експеримент» (INTERPOR'15) (Львів, 2015).

У повному обсязі дисертаційна робота доповідалась і обговорювалась на семінарах Центру математичного моделювання Інституту прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С.Підстригача НАН України, Інституту прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С.Підстригача НАН України, кафедри прикладної математики Львівського національного університету імені Івана Франка, кафедри математичного та функціонального аналізу Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника, Національному університеті „Львівська політехніка”.

Публікації. Основні результати досліджень, що відображені у дисертації, опубліковані у 24 наукових роботах, у тому числі в 13 статтях у наукових фахових виданнях, у 11 матеріалах міжнародних та всеукраїнських конференцій.

Структура дисертації. Дисертація складається зі вступу та чотирьох розділів, які містять 20 рисунків і 16 таблиць, висновків та списку літератури, що налічує 142 найменування на 15 сторінках. Повний обсяг дисертації – 157 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** подано загальну характеристику роботи, розкрито суть і стан вивчення наукової проблеми, обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано її мету, відзначено новизну отриманих результатів, висвітлено практичну цінність отриманих результатів, наведено дані про апробацію результатів і публікації, що відображають основний зміст роботи, визначено особистий внесок здобувача у публікаціях, підготовлених до друку за участю співавторів.

У **першому розділі** наведено огляд літератури за темою дисертації, окреслено її місце у вирішенні науково–прикладних задач побудови моделей і розробки методів розв’язування задач газової динаміки для потреб газотранспортних підприємств. Проведено аналіз літератури стосовно моделювання і оптимізації режимів роботи газотранспортних мереж, методів рішення задач гідравлічного розрахунку ТО, ПСГ та пісисем ГТС, сформульовані основні вимоги до моделей і методів які дають можливість забезпечити достатню точність результатів в реальних умовах їх експлуатації. В кінці розділу розглянуто основні задачі розрахунку параметрів складної газотранспортної системи з компресорними станціями.

Розвиток трубопровідного транспорту, видобутку та підземного зберігання газу зумовив розвиток відповідних фундаментальних та прикладних досліджень в наступних областях зокрема газова динаміка, фільтрація флюїдів в складних пористих середовищах, розробка методів і алгоритмів розв’язування різних типів рівнянь та систем, обґрунтування їх збіжності, оцінка їх швидкодії та складності, тощо.

Зауважимо, що задачі, які при цьому виникають, є нелінійними, дослідження їх необхідно проводити в умовах значної невизначеності тощо. Все це вимагає значних трудових затрат. Тому до появи швидкодіючих обчислювальних машин дослідження проводились, в основному, для окремих технологічних об’єктів та аналітичними методами. З появою швидкодіючих обчислювальних машин та удосконаленням і розвитком методів розв’язування задач математичної фізики почався розвиток як уточнених математичних моделей окремих технологічних об’єктів, так і моделювання складних систем в цілому. Фізичні процеси масопереносу в складних трубопровідних та пористих системах описуються нелінійними диференціальними рівняннями або нелінійними системами диференціальних рівнянь (звичайними або в частинних похідних). Так рух газу в трубопроводі, що знаходиться в ґрунті, при відповідних початково–крайових умовах в

нестационарному неізотермічному режимі описується нелінійною взаємозв'язаною системою диференціальних рівнянь в частинних похідних [1,7]

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(p + \rho v^2) &= -\rho \left(\frac{\lambda v |v|}{2D} + g \frac{dh}{dx} \right), \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho v) &= 0, \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \frac{\partial}{\partial x} \left[\rho v \left(E + \frac{p}{\rho} \right) \right] &= \frac{4k(T_{zp} - T)}{D} - \rho v g \frac{dh}{dx}, \\ p &= \rho \chi R T, \end{aligned} \quad (1)$$

де ρ, v та p – відповідно, густина, швидкість руху і тиск газу; λ – коефіцієнт гідравлічного опору; k – коефіцієнт теплопередачі від труби до ґрунту; T і T_{zp} – температура газу і ґрунту відповідно; h – глибина залягання труби; E – повна енергія одиниці маси газу; g – прискорення вільного падіння; D – діаметр трубопроводу; t – час; $x, x \in [0, l]$ – біжуча координата; l – довжина трубопроводу, χ – коефіцієнт стисливості, який характеризує відмінність реального газу від ідеального і визначається на основі побудованих емпіричних залежностей R – газова стала.

Задача неусталеної фільтрації реального газу або рідини в неоднорідному пористому середовищі (пласті підземного сховища газу) зводиться до інтегрування рівняння [2,3]

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{kh}{\mu z} \frac{\partial p^l}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y_1} \left(\frac{kh}{\mu z} \frac{\partial p^l}{\partial y_1} \right) + \frac{\partial}{\partial y_2} \left(\frac{kh}{\mu z} \frac{\partial p^l}{\partial y_2} \right) = 2mh \left(\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{p}{z} \right) + 2qp_{at} \right), \quad (2)$$

В останньому рівнянні $l=2$ для газу та $l=1$ для нестисливої рідини; $k = k(x, y_1, y_2, t)$, $m = m(x, y_1, y_2)$ та $h = h(x, y_1, y_2)$ коефіцієнти проникності, пористості та товщина середовища відповідно; μ – динамічна в'язкість речовини, p_{at} – атмосферний тиск, q – густина відбору, z – коефіцієнт стисливості газу.

Фізико-математичні моделі руху газу в трубопроводах та пористих середовищах сформульовані в роботах зарубіжних І.А. Чарного, А.В. Александрова, Є.І. Яковлева, С.А. Бобровського, М.Г. Сударева і багатьох інших та вітчизняних М.А. Жідкової, А.Д. Тівяшева, В.Я. Грудза, Я.В. Грудза, М.Тимківа, Я.Д. П'янила, М.Г. Притули, Н.М. Притули, Гіммера, Кондрата та інших вчених. Стосовно методів розв'язування рівнянь газової динаміки доцільно відзначити роботи М.А. Жідкової Є.І. Яковлева, А.В. Александрова, Ф.Г. Темпеля, М.Г. Сухарева, Я.Д. П'янила, М.Г. Притули, Н.М. Притули та інших.

Методи наближеного розв'язування задач математичної фізики розглянуто в роботах В.В. Іванова, Л.В. Канторовича, В.І. Крилова, М.М. Лаврентьєва, Г.І. Марчука, В.І. Митропольського, А.А. Самарського, О.С. Лимарченка, Ф.Г. Темпеля, І.А. Чарного, А.В. Ликова, Я.Д. П'янила, М.Г. Притули, Н.М. Притули, В.С. Дейнеки, Р.Галлагера, К.Мортонна, Ж. Міллера, Д. Норрі, Р.В. Хеммінга, Я.Г. Савули та інших.

Зауважимо, що як правило природні пористі середовища, зокрема підземні сховища газу, мають неканонічну форму і початкові та граничні умови відомі в дискретних нееквідистантних точках з невеликою точністю. Аналітичний розв'язок конкретних задач математичної фізики, поставлених на цій основі, можна отримати тільки в окремих часткових випадках. Тому для побудови методів їх розв'язування використовуються певні наближення, які повинні бути узгоджені з вибраними модельними положеннями.

Висновки. В першому розділі наведено огляд літератури за темою дисертації, окреслено її місце у вирішенні науково–прикладних задач газової динаміки в газотранспортних мережах та обробки інформації. Показана необхідність побудови адаптивних математичних моделей процесів масопереносу та постановки відповідних задач математичної фізики. Сформульовані основні вимоги до моделей і методів, які дали можливість забезпечити достатню точність результатів в реальних умовах їх експлуатації.

У **другому розділі** подано математичні моделі основних технологічних об'єктів ГТС, проведені дослідження стосовно впливу геометричних параметрів ТО та параметрів газу на процес його руху. Досліджено вплив точності вхідних даних на розрахункові режимні параметри.

Математичне моделювання роботи ГТС пов'язана з необхідністю узгодження моделей різномірних технологічних об'єктів (лінійних ділянок (трубопроводів), компресорних станцій (КС), запірної арматури) та взаємодії великої кількості джерел і споживачів. При цьому необхідно проводити газодинамічну ув'язку згідно певних законів всіх ТО, оскільки, як показує практика, розрахунок параметрів руху газу в окремо взятих ТО з наступним їх механічним об'єднанням приводить до значної похибки.

Основними взаємопов'язаними задачами, які виникають при побудові математичних моделей ГТС є:

- визначення просторово-часових меж дії математичних моделей;
- ідентифікація стану технологічних об'єктів системи та системи в цілому;
- розрахунок режимно-технологічних параметрів системи та знаходження оптимальних параметрів;
- розрахунок прогнозних параметрів системи;
- керування режимами роботи системи.

Пласти підземних сховищ газу, як і родовищ, мають порівняно невелику товщину. Зміна тиску на такому перепаді висот є незначною і нею можна знехтувати. Якщо розглядати розподіл тиску в області свердловини, то рівняння (2) доцільно записати в циліндричних координатах. Враховуючи, що область свердловини порівняно із всім сховищем є невеликою, параметри, які входять в рівняння (2), можна вважати сталими за координатою на деякому проміжку часу. За таких допущень рівняння рівняння фільтрації газу в циліндричних координатах має вигляд

$$\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial r} = \frac{D}{p_0} \frac{\partial p}{\partial \tau}, \quad (3)$$

де r – радіус-вектор, проведений з центру свердловини, p_0 , p_2 – початкове значення тиску та значення тиску на границі області, за Лейбензоном

$$\tau = \frac{p_2}{p_0} t + \left(1 - \frac{p_2}{p_0}\right) \frac{1 - e^{-\beta t}}{\beta}, \quad \beta = \frac{p_0 k \lambda_m^2}{2m\mu}.$$

Модель КС у найпростішому випадку можна подати у вигляді

$$p_n^2 - \theta p_k^2 = \sigma q^2, \quad (4)$$

де θ та σ – деякі сталі.

Спад тиску на місцевих опорах визначається формулою

$$\Delta p = \rho \frac{v^2}{2} \xi, \quad (5)$$

де ξ – коефіцієнт місцевого опору, який обчислюється за експериментальними даними. Формула (5) використовується для побудови аналітичних та емпіричних моделей різного

роду місцевих опорів, зокрема, поворотів трубопроводу, трійників, пристроїв звуження та розширення трубопроводів, відкриття та закриття кранів, тощо.

Розподіл температури вздовж трубопроводу розраховується за формулою

$$T = T_{ep} + (T_0 - T_{ep})e^{-ax} - \left[D_i \frac{p_n - p_k}{L} + \frac{q \Delta h}{C_p L} \right] \frac{1 - e^{-ax}}{a}. \quad (6)$$

Тут позначено: D_i – коефіцієнт Джоуля-Ленца; C_p – коефіцієнт теплопередачі від газу до ґрунту; Δh – перепад висот між кінцем і початком газопроводу; p_0, p_k – значення тиску на початку і в кінці газопроводу; $a = k\pi D/C_p M$.

Математична модель ГТС будується на базі подання її у вигляді орієнтованого графу $G(V, E)$ з множиною вершин V і множиною ребер E . Вершини графу відповідають тим об'єктам ГТС, для яких вхід і вихід нерозрізняються (відбори, пункти виміру, місця відводів). Ребрами графу є об'єкти, для яких характерна наявність входу і виходу (лінійна ділянка, кран, компресорна станція, редуктор і т.п.). Орієнтація ребер відповідає напрямку руху газу. Математична модель ГТС будується за умовами балансу витрат газу у всіх вершинах і рівнянь, які зв'язують параметри в початковій і кінцевій вершинах кожної дуги з витратою на ній q і напором H

До моделювання руху газу в ГТС в стаціонарному випадку існують два підходи: алгоритмічний та алгебраїчний. Перший ґрунтується на залежності між витратою q і напором H виду $\varphi_n - \varphi_k + H = f(\mathbf{a}, q)$, де \mathbf{a} – вектор, параметри якого характеризують дугу, і побудови алгоритму знаходження значень тиску та витрати на кожній дузі і вершині графу.

Другий підхід базується на гідравлічній ув'язці у вузлах графа і зводиться до побудови контурних рівнянь та необхідності знаходження їх розв'язків.

Висновок. У другому розділі подано математичні моделі основних технологічних об'єктів, досліджено вплив параметрів ТО і газу на їх адекватність та процес масопереносу в цих ТО.

В третьому розділі побудовано математичну модель роботи ПСГ. Для цього спочатку подано огляд основних законів фільтрації та характеристику параметрів технологічних об'єктів ПСГ, зокрема пластів підземних сховищ газу. Розглянуто способи розрахунку параметрів роботи ПСГ.

Для розрахунку параметрів руху газу в пластах підземних сховищ використовується рівняння (2) з першого розділу праці.

У випадку моделювання фільтрації газу в пластах ПСГ необхідно розглядати дві області: власне пласт ПСГ та вибійну зону, яка займає невелику область в околі вибою свердловини. Необхідність такого поділу пояснюється тим, що в області пласта ПСГ, яка знаходиться на певній віддалі від свердловини, фільтрація газу здійснюється згідно закону Дарсі, тобто є лінійна залежність між тиском та дебетом свердловини. У вибійній зоні рух газу не задовольняє закон Дарсі. На цей час найбільш використовуваним і придатним для практики є використання квадратичного закону фільтрації.

Подано математичну модель привибійної зони для рівномірно анізотропних та ізотропних пластів.

Рівняння фільтрації газу в декартових координатах мають місце в довільній просторовій області. Очевидно, що отримати параметричний розв'язок відповідної задачі математичної фізики в загальному випадку проблематично. Розв'язок можна отримати числовими способами, зокрема, методом скінчених різниць та методом скінчених елементів. Числові методи мають той недолік, що при згущенні сітки розбиття погіршується їх стійкість. У випадку дослідження свердловин основна зміна газодинамічних параметрів проходить в невеликому околі свердловини. Це означає, що в цьому випадку необхідно достатньо сильно згущувати сітку розбиття, що може привести до нестійкого розв'язку.

Далі, мають місце ряд прогнозних задач, які не вимагають достатньо точних розв'язків і для яких достатньо отримати якісну картину процесу. В таких випадках достатньо добре зарекомендував себе метод зведення фільтраційного рівняння до циліндричних або полярних координат. Відомо багато методів, які дають можливість отримати розв'язок цих рівнянь в аналітичному вигляді.

Обчислювальний експеримент проводився за наступних значень параметрів: початковий пластовий тиск $p_n=50$ атм, тиск на внутрішньому контурі $p_c=49$ атм, внутрішній радіус $r_c=0.1$ м, зовнішній радіус $r_k=750$ м, абсолютна точність знаходження коренів $\varepsilon_k=0.000001$, абсолютна точність обчислення сум $\varepsilon_c=0.001$, коефіцієнт проникності $k=1.02d-12$ м², коефіцієнт пористості $m=0.2$, коефіцієнт динамічної в'язкості $\mu=1.223d-5$, густина газу в стандартних умовах $\rho_0=0.682$ кг/м³, температура газу $T=300$ К, газова стала $R=510$ Дж/кг °К для різних значень часів. Зауважимо, що в цьому випадку початкові і граничні умови є неузгодженими, оскільки при $t=0$ та $r=r_c$ функція розподілу тиску $p(r,t)$ має розрив першого роду (стрибок $|p_c - p_n|$). Результати обчислень подано на рис. 1 та рис. 2.

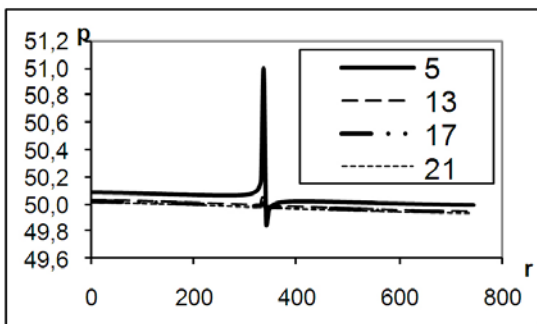


Рис. 1. Залежність розподілу пластового тиску від радіуса для різних значень часу (у годинах від початку відбору)

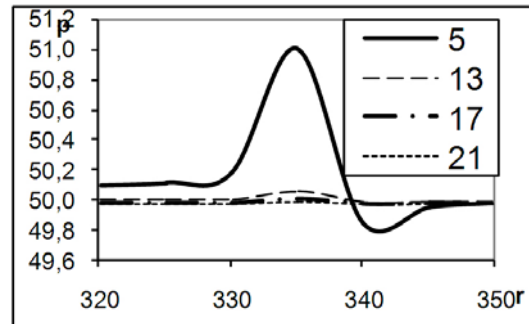


Рис. 2. Залежність розподілу пластового тиску від радіуса в околі особливої точки для різних значень часу (у годинах від початку відбору)

Результати обчислень показують, що поведінка шуканих розподілів тиску визначається декількома першими доданками сум рядів за функціями Бесселя та Неймана.

Висновки. В третьому розділі побудовано та досліджено математичні моделі роботи технологічних об'єктів ПСГ. Особливу увагу приділено моделюванню пластів підземних сховищ газу, оскільки від характеру фільтрації залежить робота сховища.

У **четвертому розділі** подано математичну модель роботи системи пласт підземного сховища газу-газозбірний пункт (шлейфовий спосіб збору) та розглянута задача оптимізації циклічної роботи підземних сховищ газу. Запропоновано алгоритм розрахунку режимних параметрів роботи системи, досліджено вплив способу включення підземного сховища газу в магістральний газопровід на енергетичні витрат. Результати досліджень апробовані в ході обчислювального експерименту.

Основні задачі, які необхідно розв'язати на базі побудованої математичної моделі роботи ПСГ, полягають в тому, щоб:

- за відомим розподілом пластового тиску і заданій величині об'ємного відбору Q_z визначити тиск на вході в газозбірний пункт;
- за відомим розподілом пластового тиску і заданій величині вхідного тиску на ГЗП визначити об'ємний відбір газу Q_z зі сховища;

- за відомим розподілом пластового тиску і заданій мінімальній величині вхідного тиску на ГЗП визначити максимальний об'ємний відбір газу Q_z зі сховища.

Враховуючи геометричні розміри шлейфів та горизонтальних трубопроводів для обчислення розподілу тиску в них достатньо використати стаціонарні моделі руху газу в горизонтальній трубі. Якщо використати побудовані раніше математичні моделі ТО, які беруть участь в роботі ПСГ, то отримуємо наступне нелінійне рівняння відносно дебіту свердловини q :

$$p_{nl}^2 - p_{gsp}^2 e^b = Aq + 2DFG + [B + (a_s + a_o + a_r) e^b] q^2. \quad (7)$$

У поданому вище співвідношенні використано позначення:

$$D(r, \tau) = \frac{(b\lambda_m) Z_1(b\lambda_m) Z_0(r\lambda_m)}{(a\lambda_m)^2 Z_0^2(a\lambda_m) - (b\lambda_m)^2 Z_1^2(b\lambda_m)},$$

$$\frac{1}{F} = \frac{4\pi nkhg}{\beta(n+1)\mu} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(b\lambda_m)^2 Z_1(b\lambda_m) Z_1(r\lambda_m) \exp\left(-\frac{p_0 \tau \lambda_m^2}{D}\right)}{(a\lambda_m)^2 Z_0^2(a\lambda_m) - (b\lambda_m)^2 Z_1^2(b\lambda_m)}$$

$$A = \frac{A_1}{k_{nl}} + \frac{A_2}{k_b}, \quad B = \frac{B_1}{k_{nl}^{3/2}} + \frac{B_2}{k_b^{3/2}}, \quad a_r = \lambda zL_r \frac{RT}{D} \left(\frac{\rho_0}{S}\right)^2 \frac{1-e^{-b}}{b}, \quad a_s = \lambda zL_s \frac{RT}{D} \left(\frac{\rho_0}{S}\right)^2, \quad a_o = \xi \frac{zRT}{S^2}.$$

При відборі-закачуванні газу в ПСГ у більшості випадків мають місце три типи з'єднань свердловини з ГЗП:

1. Свердловина з'єднана з ГЗП окремим (індивідуальним) шлейфом. При цьому об'єктами шлейфово-колекторної системи є: пласт; вибійна зона; робоча колона (НКТ); обв'язка свердловини; шлейф; ГЗП. Для розрахунку названих об'єктів використовуються їх математичні моделі з врахуванням місцевих опорів.

2. Шлейф є спільним для двох свердловин. В даному випадку до елементів, названих в пункті 1, додаються наступні: пласт, вибійна зона та робоча колона (НКТ) для другої свердловини і трійних з відповідним місцевим опором, через який друга свердловина підключена до шлейфу.

3. Шлейф-колектор є спільним для двох свердловин, причому робоча колона ближньої свердловини з'єднана із шлейфом горизонтальним трубопроводом (шлейф 2). В останній тип з'єднання входять всі елементи другого разом з врахуванням обв'язки другої свердловини та додаткового шлейфу, який з'єднує другу свердловину з основним шлейфом.

При побудові алгоритму гідравлічної ув'язки пласт ПСГ-ГЗП необхідно враховувати вказані вище типи з'єднань.

Окремо розглянуто колектор, до якого приєднано n свердловин (рис. 3), де: $p_{pl,i}$ - значення пластового $p_{v,i}$ - вибійного $p_{g,i}$ - гирлового тисків в околі i -ї свердловини.

Для побудови гідравлічної ув'язки системи пласт – газозбірний пункт використовуються співвідношення між вихідними та вхідними тисками на відповідних технологічних об'єктах.

Алгоритм розрахунку

1. Задамо початкове значення дебіту q_1 останньої від ГЗП свердловини. Тоді мають місце наступні співвідношення:

$$p_{pl,1}^2 - p_{v,1}^2 = A_1 q_1 + B_1 q_1^2, \quad p_{v,1}^2 - p_{g,1}^2 \exp(b_1) = a_{s,1} q_1^2 \exp(b_1).$$

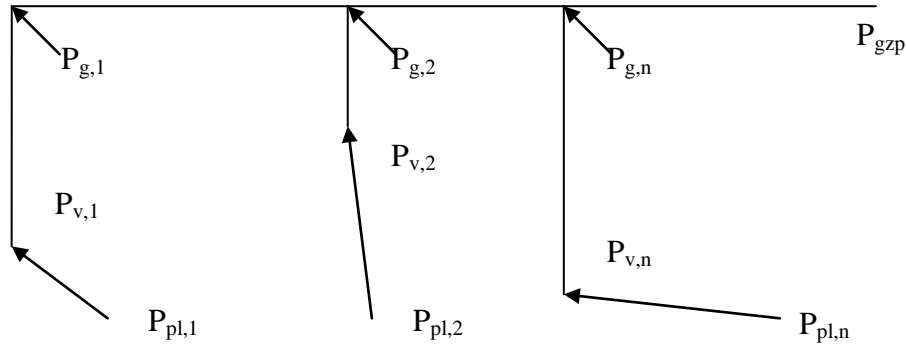


Рис. 3. Структурна схема колекторного збору газу.

2. З останніх двох рівностей маємо

$$p_{g,1}^2 = p_{pl,1}^2 \exp(-b_1) - \left[A_1 \exp(-b_1) q_1 + (B_1 \exp(-b_1) + a_s) q_1^2 \right].$$

3. Оскільки

$$p_{g,1}^2 - p_{g,2}^2 = a_{sh,12} q_1^2,$$

то гірловий тиск на другій свердловині обчислюється за формулою

$$p_{g,2}^2 = p_{pl,1}^2 \exp(-b_1) - \left[A_1 \exp(-b_1) q_1 + (B_1 \exp(-b_1) + a_{s,1}) q_1^2 \right] - a_{sh,12} q_1^2.$$

4. Зв'язок між пластовим тиском в околі другої свердловини та відповідним гірловим тиском задається формулою

$$p_{pl,2}^2 - p_{g,2}^2 \exp(b_2) = A_2 q_2 + (B_2 + a_{s,2} \exp(b_2)) q_2^2.$$

5. З останнього рівняння знаходимо q_2 . Для двох послідовних підключень свердловин до колектора можна записати

$$p_{g,2}^2 - p_{g,3}^2 = a_{sh,23} (q_1 + q_2)^2,$$

звідки знаходимо $p_{g,3}$.

6. Для третьої свердловини має місце співвідношення

$$p_{pl,3}^2 - p_{g,3}^2 \exp(b_2) = A_3 q_3 + (B_3 + a_{s,3} \exp(b_2)) q_3^2,$$

яке дає можливість знайти q_3 .

7. Аналогічно процес продовжується до n -ї свердловини.

8. Рівність, що пов'язує n -ту свердловину з газозбірним пунктом буде мати вигляд

$$p_{g,n}^2 - p_{gzp}^2 = a_{sh,n,gzp} (q_1 + q_2 + \dots + q_n)^2.$$

Умова закінчення алгоритму. Якщо задасться відбір газу Q_z з колектора, то за такого алгоритму можливі варіанти:

$$1 - Q_r = q_1 + q_2 + \dots + q_n < Q_z;$$

$$2 - Q_r = q_1 + q_2 + \dots + q_n = Q_z;$$

$$3 - Q_r = q_1 + q_2 + \dots + q_n > Q_z.$$

Якщо виконується перша умова, то для розв'язку поставленої задачі необхідно збільшити відбір газу з найдалшої свердловини, тобто замість q_1 взяти $q_1 + \Delta q$ та повторити поданий вище алгоритм.

Якщо виконується друга умова, то поставлена задача розв'язана. Для заданого відбору газу на ГЗП необхідно підтримувати тиск p_{gzp} .

За виконання третьої умови необхідно замість q_1 взяти $q_1 - \Delta q$ та повторити поданий вище алгоритм.

Очевидно, що процес необхідно продовжувати до того часу, поки не буде виконуватись нерівність $|Q_r - Q_z| \leq \varepsilon$, де ε - задана точність обчислення сумарного відбору газу з колектора.

Описаний вище алгоритм має місце в тому випадку, коли відомо об'ємний відбір газу з пласта-колектора.

Якщо ж задається значення тиску на ГЗП $p_{gzp,z}$, то описаний алгоритм дозволяє визначити відбір газу зі сховища. Для розв'язку поставленої задачі описаний алгоритм повторюється з тією різницею, що умовою його закінчення буде рівність $p_{gzp,r} = p_{gzp,z}$, де

$$p_{gzp,r}^2 = p_{g,n}^2 - a_{sh,n,gzp} (q_1 + q_2 + \dots + q_n)^2.$$

Для вивчення впливу способу підключення ПСГ у МГ на енергетичні затрати транспортування газу з урахуванням гідравлічної ув'язки системи пласт ПСГ-МГ побудована математична модель сумісного функціонування підземного сховища газу та газотранспортної системи.

Досліджено вплив способу включення ПСГ в магістральний газопровід (до чи після КС) на енергетичні затрати транспорту газу. Моделюється процес руху газу в системі, що складається з ділянки МГ (рис. 4.), на якій розміщені три компресорні станції (КС), з'єднані трубопроводами I і II та ПСГ зі своєю дотискуючою КС. Математична модель цієї системи формується з моделей технологічних об'єктів, які в точках стику узгоджуються на базі відповідних фізичних законів [1, 2]. Зауважимо, що крайові умови відповідних задач математичної фізики будувалися на основі заміряних даних або з умов спряженості.

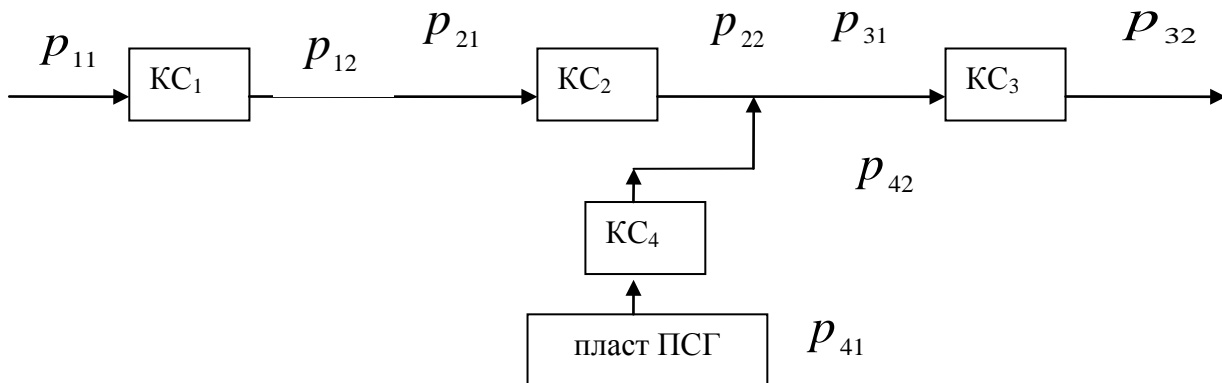


Рис. 4. Структурна схема включення підземного сховища газу в магістральний газопровід.

Обчислювальний експеримент проводився для горизонтально розміщеного МГ за наступних вхідних даних:

$p_{11}=55$, $p_{32}=65$, $p_a=1.033$, $Q_1=900$, $Q_2=180.$, $R=518$, $\rho_0=0.68$, $tg=288$, $t_{11}=290$, $t_{41}=290$, $C_p=2520$, $D_i=0.4$, $L_1=90000$, $L_2=100000$, $d_1=d_2=1.338$, $\lambda_1=\lambda_2=0.002$, $k_{gr1}=1$, $k_{gr2}=1.3$, $p_n=50$, $A=1.02$, $B_1=0.008$, $\varepsilon_1=1.21$, $\varepsilon_2=1.22$, $\eta_{zmy1}=0.84$, $\eta_{zmy2}=0.85$, $\eta_{zmy3}=0.85$, $\eta_{zmy4}=0.82$, $k_1=1.31$, $k_2=1.32$, $k_3=1.3$, $k_4=1.31$, $Q_{n1}=Q_{n2}=Q_{n3}=Q_{n4}=36000000$, $\xi_1=\xi_2=\xi_3=\xi_4=0.28$, $K_{31}=0.5$, $K_{32}=0.6$, $K_{33}=0.45$, $K_{34}=0.5$. Вхідні величини задані в системі СІ і для скорочення запису їх розмірності опущено.

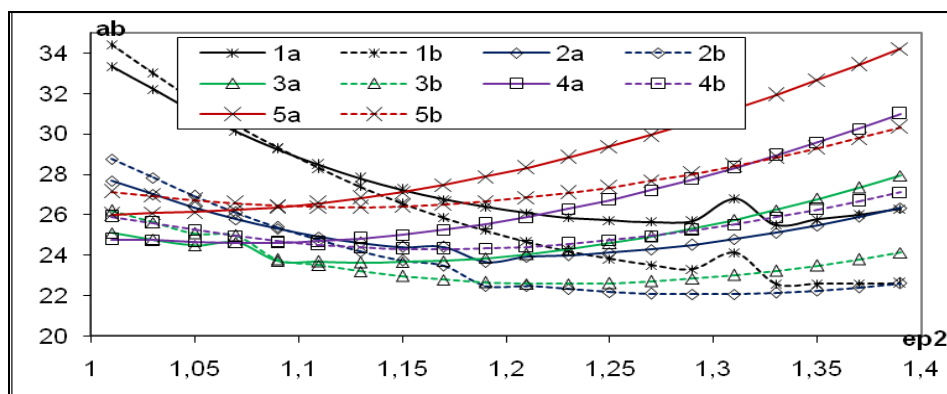
За заданими вхідними даними з рівномірним кроком змінювалися коефіцієнти стискуваності на перших двох КС. Коефіцієнти стисливості на третій та четвертій КС обчислювалися на основі побудованої гідравлічної ув'язки. При цьому вхідні дані залишалися сталими. Наявність букви в індексі означає: а - сумарний паливний газ q_{pvx}

під'єднання ПСГ на вхід другої КС qp , в - сумарний паливний газ q_{pvyx} під'єднання ПСГ на вихід другої КС $qp1$. Відповідність кривих різним значенням коефіцієнтів стиску на першій та четвертій КС подано в табл. 1.

Таблиця 1.

№ кривої	ε_1	ε_4
1	1.01	1.151
2	1.19	1.378
3	1.25	1.454
4	1.31	1.529
5	1.39	1.629

Деякі з результатів обчислень наведено на рис. 5, де на осях ординат відкладено значення функцій, які визначено вище буквами а, в.

Рис. 5. Залежність сумарного паливного газу від коефіцієнта стиску на КС₂ ε_2

Висновки, які можна зробити з отриманих результатів, наступні.

Для заданих значень коефіцієнтів стиску на першій та четвертій КС практично у всіх випадках існують такі їх співвідношення, при яких буде витрачено мінімальна кількість паливного газу за обох способів підключення ПСГ.

В кожному випадку існує такі значення коефіцієнтів стиску $\varepsilon_{i0}, i=1,2,3,4$, при яких кількість паливного газу не залежить від підключення ПСГ (криві сумарного паливного газу при різних підключення ПСГ до МГ мають точку перетину).

Місце включення ПСГ в МГ впливає не тільки на сумарний паливний газ, але і на характер його залежності від коефіцієнтів стиску на КС.

Керуючими параметрами процесу руху газу в системі МГ, що досліджується, є коефіцієнти стиску газу на першій і другій компресорних станціях, тобто сумарна кількість паливного газу q є функцією аргументів ε_1 та ε_2 ($q = f(\varepsilon_1, \varepsilon_2)$). Отримані функціональні залежності величини паливного газу від ε_1 та ε_2 дозволяють знайти глобальний мінімум за цими параметрами й, отже, дослідити вплив способу підключення ПСГ у МГ на сумарні енергетичні затрати. Точки екстремумів знаходимо з системи рівнянь

$$\frac{\partial q}{\partial \varepsilon_1} = \frac{\partial f(\varepsilon_1, \varepsilon_2)}{\partial \varepsilon_1} = 0, \quad \frac{\partial q}{\partial \varepsilon_2} = \frac{\partial f(\varepsilon_1, \varepsilon_2)}{\partial \varepsilon_2} = 0.$$

За знайденими точками екстремумів ε_{1m} та ε_{2m} отримуємо глобальний мінімум функції $f(\varepsilon_1, \varepsilon_2)$, який і визначає мінімальну величину паливного газу в підсистемі.

Розглянуто задачу оптимізації циклічної роботи підземних сховищ газу. Для того, щоб компресорна станція могла перекачати об'єм газу Q , мінімальні параметри ГПА, необхідні для виконання завдання визначаються з рівності

$$\xi \frac{zR}{m} Q T_1 \left(\varepsilon^{m/\eta_{mol}} - 1 \right) = \left(\left[\frac{N_1}{\rho_n} \right]_{pr} \frac{p_1}{zRT} \left(\frac{n}{n_n} \right)^3 \left(\frac{z_n R_n T_n}{zRT} \right)^{1.5} + N_{mex}^a \right) K_{Ne} \left(1 - K_t \frac{t - t^0}{t + 273} \right) \frac{p}{0,1033}. \quad (8)$$

При цьому необхідна кількість паливного газу обчислюється за формулою

$$q_n = 0.02064 \frac{N_{KC}}{1.16 \eta_{zmy} Q_n} \left[\frac{3}{4} + 0.025 \frac{p_a}{1.033 K_3} \sqrt{\frac{T_1}{288}} \right], \quad (9)$$

де Q_n - нижня теплотворна здатність газу ($\text{джс}/\text{м}^3$), η_{zmy} - к.к.д. газотурбінного приводу компресора, p_a - атмосферний тиск (МПа), K_3 - коефіцієнт завантаження двигуна.

Для оптимізації сумісної роботи системи ПСГ та МГ необхідно розв'язати наступні задачі.

1. Побудувати кореляційний зв'язок між: температурою оточуючого середовища та споживанням газу; споживанням газу за регіонами; міжрегіональним транспортом газу.
2. Визначити енергетичні затрати (паливний газ на лінійних КС) на міжрегіональний транспорт;
3. Енергетичні затрати на закачування газу в ПСГ;
4. Енергетичні затрати на відбирання газу;
5. Оцінка необхідної кількості газу для покриття потреб наявного активного газу, можливістю пікового транспортування;
6. Мінімізація енергетичних затрат.

Кореляція між температурою оточуючого середовища та кількістю спожитого газу будується на базі даних попередніх декількох років. Вважається, що газ поступає з декількох джерел: 1) власний видобуток; 2) імпортований газ; 3) газ із підземних сховищ; 4) використання транзитного газу.

У ролі споживачів газу будемо вважати населення та промисловість. Слід зауважити, оскільки промислове виробництво в Україні є нестабільним, то і об'єми споживання газу в промисловості теж будуть нестабільними. Цей факт необхідно врахувати при побудові кореляційних залежностей (очевидно, що в певних межах). Далі вважається, що видобуток власного газу та використання транзитного є постійним на деякому заданому часовому інтервалі (наприклад, листопад, грудень). Керувати поставками газу можна за рахунок імпорту або відбирання газу із підземних сховищ.

Введемо позначення: $k, k \in [1, K]$ - номер підсистеми, на якій розбита ГТС України; i_{kv} - вітка МГ, вздовж якої рухається газ в k -й підсистемі, $i_{kv} = [1, I_{kv}]$; j_{ikv} - номер j -ї КС на i_{kv} -й. Якщо $q_{nki,j_i} = q(Q_{k,i_v}, p_{vx,k,i_v,j_i}, p_{vyx,k,,i_v,j_i}, T_{k,i_v,j_i}, t)$ - паливний газ j_i -ї КС на i_v - вітці в k -й підсистемі, то в момент часу t сумарний паливний газ q_{ns} буде

$$q_{ns} = \sum_{k=1}^K \sum_{i_v}^{I_v} \sum_{j_i}^{J_i} \int_0^t q(Q_{k,i_v}, p_{vx,k,i_v,j_i}, p_{vyx,k,,i_v,j_i}, T_{k,i_v,j_i}, \tau) d\tau.$$

Оскільки на кожній КС паливний газ обчислюється за формулою (11), то остання формула дає можливість розраховувати оптимальні за критерієм мінімуму затраченого паливного газу параметри сумісної роботи підземних сховищ газу в системі магістральних трубопроводів. При цьому розрахунок параметрів роботи підземного сховища газу подано вище.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

У роботі розв'язано актуальне науково-технічне завдання розроблення аналітико-числових методів та математичних моделей руху газу в складних системах транспорту і розподілу газу, які дали можливість побудувати ефективні методи і алгоритми розрахунку і оптимізації газопотоків.

1. На основі аналізу відомих математичних моделей процесів взаємодії руху газу з технологічними об'єктами та методів розв'язування відповідних нелінійних рівнянь і систем показана необхідність побудови нових і уточнення існуючих моделей і методів для забезпечення отримання необхідної точності результатів за прийнятний час.

2. Запропонована математична модель газотранспортної системи, яка пов'язує моделі технологічних схем із змінною топологією і різноманітні математичні моделі технологічних об'єктів (з зосередженими та розподіленими параметрами, заданих у вигляді аналітичних співвідношень, диференціальних рівнянь і систем, описаних алгоритмічно) технологічних об'єктів, що дало можливість побудувати методи, ітераційні процедури і алгоритми для знаходження параметрів потоків газу для існуючих типів, структурної організації газових мереж, існуючих технологій транспорту, керування та розподілу газопотоків.

3. Побудовано числово-аналітичні моделі знаходження розподілу тиску, температури та масової швидкості газу в трубопроводах та пористих середовищах. Граничні та початкові умови будуються на базі експериментальних даних, які зазнають попередньої обробки.

4. На базі газодинамічної ув'язки потоків газу побудовано алгоритми колекторного та шлейфового зборів газу при роботі ПСГ. Досліджено їх ефективність та вплив на процес ув'язки параметрів газу та ТО.

5. Розроблено алгоритми і побудовано ітераційні схеми розв'язування нелінійних задач масопереносу та дифузії газу в пористих середовищах із зосередженими джерелами.

6. Досліджено ефективність та точність побудованих алгоритмів шляхом проведення обчислювальних експериментів на модельних задачах та апробації результатів у практичних розрахунках на реальних даних.

7. Розроблено алгоритми розрахунку режимних параметрів транспорту газу з метою мінімізації енергетичних ресурсів для систем, які складаються групи магістральних трубопроводів та підземних сховищ газу.

8. Проведені теоретичні дослідження та числові експерименти для обґрунтування принципів оптимального керування газопотоками. В якості критерію оптимальності використовується, як правило, мінімізація енергетичних затрат на транспорт газу.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Публікації у наукових фахових виданнях.

1. Pyanylo Ya. D. Optimization of energy costs for gas transportation in complex gas transmission systems / Ya.D.Pyanylo, S.V.Gladun // ANNALS of Faculty Engineering Hunedoara – International Journal of Engineering 31. – Fascicule 3, Tome XIII. – 2015 – 6 p.
2. Гладун С. Моделювання масопереносу в системі пласт підземного сховища газу - магістральний газопровід з метою оптимізації його роботи / С. Гладун // Фізико-математичне моделювання та інформаційні технології. – 2016. – Вип. 23. – С. 52-61.
3. П'янило Я. Аналітичний спосіб розрахунку параметрів гідравлічної ув'язки колекторного збору газу / Я. П'янило, С. Гладун, Г. П'янило // Вісник Національного університету "Львівська політехніка": Комп'ютерна інженерія та інформаційні технології. – Львів, 2011. – № 719. – С. 250-256.

4. Химко М. П. Вплив сил тертя на розподіл температури газових потоків та склад газу / Химко М. П., Фролов В. А., Гладун С. В., П'янило Я. Д., Притула М. Г., Землянський Б. В. // Нафтова і газова промисловість. – 2005. – № 5. – С. 56-58.
5. Дацюк А. В. Розрахунок об'ємів акумульованого газу в газотранспортній системі / Дацюк А. В., Гладун С. В., П'янило Я. Д., Притула М. Г., Притула Н. М. // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”: Комп'ютерна інженерія та інформаційні технології. – Львів, – 2009. – № 638. – С.81-85.
6. Гладун С. Розрахунок гідродинамічних параметрів стану об'єктів транспорту газу / Гладун С., Притула Н., Землянський Б., Химко О. // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”: Комп'ютерні науки та інформаційні технології. – Львів, 2008. – № 629. – С. 92-99.
7. Гладун С. Нестационарна дифузія газу в пористих середовищах із зосередженими джерелами / С. Гладун, Я. П'янило, М. Притула // Вісник Національного університету “Львівська політехніка: Комп'ютерні науки та інформаційні технології. – 2009. – № 650. – С. 195-199.
8. Притула Н. Оптимізація режимів роботи газотранспортної системи / Н. Притула, М. Притула, А. Дацюк, С. Гладун, О. Химко // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”: Комп'ютерні науки та інформаційні технології. – 2011. – № 694. – С. 395-401.
9. Притула Н. Паливно-енергетичні затрати на транспортування газу / Н. Притула, М. Притула, В. Ямнич, А. Дацюк, С. Гладун, О. Химко // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”: Комп'ютерні науки та інформаційні технології. – 2011. – № 710. – С. 128-132.

Публікації, що додатково відображають результати досліджень.

10. Притула Н. Про оптимальні режими роботи багато ниткових магістральних газопроводів / Н. Притула, М. Притула, В. Ямнич, А. Дацюк, С. Гладун, О. Химко // Вісник Національного університету “Львівська політехніка: Комп'ютерні науки та інформаційні технології. – 2011. – № 719. – С. 256-261.
11. Притула Н. Тепловий режим транспортування газу /Н. Притула, М. Притула, В. Ямнич, А. Дацюк, С. Гладун, О. Химко // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”: Комп'ютерні науки та інформаційні технології. – 2011. – № 710. – С. 234-239.
12. Дацюк А. Розрахунок об'ємів акумульованого газу в газотранспортній системі / А. Дацюк, С. Гладун, Н. Притула, М. Притула, Я. П'янило // Вісник Національного університету “Львівська політехніка: Комп'ютерні науки та інформаційні технології. – 2009. – № 650. – С. 81-85.
13. Химко М. П. Розрахунок режимних параметрів роботи газотранспортних систем / М. П. Химко, О. Т. Михалевич, В. А. Фролов, С. В. Гладун, В. А. Павленко, Я. Д. П'янило, М. Г. Притула, Н. М. Притула // Інформаційний огляд ДК “Укртрансгаз”. – 2004. – № 5 (29). – С. 2-5.

Тези та матеріали конференцій

14. Химко М. П. Программный комплекс для расчета режимных параметров газотранспортной системы / М. П. Химко, О. Т. Михалевич, В. А. Фролов, С. В. Гладун, В. А. Павленко, Я. Д. П'янило, М. Г. Притула, Н. М. Притула // 2 Междунар. науч.-техн. конф. “Теория и практика разработки, промышленного внедрения компьютерных комплексов”: тезисы докладов. – Москва, 2004. – С. 72-73.

15. Дацюк А.В. Програмный комплекс для определения газодинамических параметров работы газотранспортных систем / А.В.Дацюк, Фролов В.А., Гладун С.В., Пяныло Я.Д., Притула М.Г., Н.М.Притула, Б.В.Землянский, Н.Б.Лопух // Тез. докл. 3-й Междунар. науч.-техн. конф. “Компьютерные технологии поддержки принятия решений в диспетчерском управлении газотранспортными и газодобывающими системами”. – Москва, 2007. – С.27–27.
16. Дацюк А. В. Управление потоками газа в газотранспортных системах / А. В. Дацюк, В. А. Фролов, С. В. Гладун, Н. М. Притула, Я. Д. Пяныло, М. Г. Притула // 4-я Межд. науч.-техн. конф. “Компьютерные технологии поддержки принятия решений в диспетчерском управлении газотранспортными и газодобывающими системами”: сборник докладов. – Москва, 2009.– С. 277-282.
17. Дацюк А. В. Програмный комплекс для моделирования і оптимізації роботи газотранспортних систем / Дацюк А. В. , Фролов В. А., Гладун С. В., Химко О. М., Пяныло Я. Д., Притула М. Г., Притула Н. М., Землянский Б. В., Лопух Н. Б. // 3-тя Міжнар. наук.-техн. конф. „Комп’ютерні науки та інформаційні технології” (CSIT 2008). – Львів, 2008. – С. 330-333.
18. Притула Н. М. Математичні моделі фільтраційних і газодинамічних процесів для розрахунку режимів роботи підземних сховищ газу (програмний комплекс) / Н. М. Притула, Я. Д. Пяныло, М. Г. Притула, Р. И. Боровий, Р. Л. Вечерік, Ю. Б. Хаєцький, С. В. Гладун // П’ята наук.-практ. конф. з міжнародною участю „Математичне та імітаційне моделювання систем” (МОДС 2010). – Київ, 2010. – С. 140-141.
19. Притула Н. М. Математичні моделі і методи розрахунку режимів роботи газотранспортної системи України (програмний комплекс) / Притула Н. М., Пяныло Я. Д., Притула М. Г., Дацюк А. В. , Фролов В. А., Гладун С. В. // П’ята наук.-практ. конф. з міжнародною участю „Математичне та імітаційне моделювання систем” (МОДС 2010). – Київ, 2010. – С. 138-139.
20. Притула Н. М. Топливо-энергетические затраты на транспорт газа (результаты численных экспериментов) / Н. М. Притула, М. Г. Притула, О. Д. Грынив, И. Боярин, В. И. Ямнич, П. Г. Вавричук, А. В. Дацюк, В. А. Фролов, С. В. Гладун // Наук.-техн. конф. “Інформаційні системи і технології в енергетиці і житлово-комунальній сфері”: матеріали конференції. – Ялта, 2011. – С. 23-24.
21. П’яныло Я. Д. Підземні сховища газу в системі магістральних газопроводів / П’яныло Я. Д., Гладун С. В. // Матеріали междунар. науч.-техн. конф. „Інформаційні системи і технології в енергетиці і житлово-комунальній сфері” (ИСТЭ 2011). – Ялта, 2011. - С. 24-26.
22. Притула Н. Расчет оптимальных параметров управления потоками в газотранспортных системах ладун / Н. Притула, М. Притула, О.Грынив, А. Дацюк, В. Фролов, С. Гладун // 5-ая Междунар. науч.-техн. конф. “Компьютерные технологии поддержки принятия решений в диспетчерском управлении газотранспортными и газодобывающими системами”: тезисы докладов. – Москва, 2012. – С. 63.
23. Притула Н. Подземные хранилища и эффективное управление транспортом газа / Н. Притула, М. Притула, О. Грынив, С. Гладун, Р. Вечерік, П. Галий // 5-ая Межд. науч.-техн. конф. “Компьютерные технологии поддержки принятия решений в диспетчерском управлении газотранспортными и газодобывающими системами”: тезисы докладов. – Москва, 2012. – С. 59.

24. П'янило Я. Д. Розрахунок режимних параметрів роботи підсистеми транспорту газу пласт підземного сховища – магістральний газопровід / П'янило Я. Д., Гладун С. В., Притула М., Притула Н., П'янило Г. // Наук.-техн. конф. «Мікро- та нанонеоднорідні матеріали: моделі та експеримент» (INTERPOR'15). – Львів, 2015. – С. 67-69.

АНОТАЦІЇ

Гладун С. В. Моделювання та розрахунок оптимальних параметрів роботи підземного сховища газу в системі магістральних трубопроводів. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – „Математичне моделювання та обчислювальні методи”. – Національний університет „Львівська політехніка”, Міністерство освіти і науки України, Львів, 2017.

У роботі вирішено науково-практичне завдання розроблення та аналізу математичних моделей руху газу в трубопроводах і природних пористих середовищах та побудови математичної моделі сумісної роботи газотранспортної системи і підземних сховищ газу з метою оптимізації режимних параметрів, побудови методів та алгоритмів розрахунку гідродинамічних параметрів руху газу для побудови розрахункових схем газотранспортних мереж. Для досягнення цієї мети у дисертації були поставлені та вирішені такі основні завдання: досліджено математичні моделі масопереносу в газопроводах та пористих середовищах та вивчено вплив гідродинамічних параметрів газу та геометричних параметрів трубопроводів і пластів ПСГ на цей процес; сформульовано задачі математичної фізики стосовно знаходження розподілу тиску, температури та масової швидкості газу в трубопроводах та пористих середовищах; розроблено алгоритми і побудовано ітераційні схеми розв'язування нелінійних задач масопереносу та дифузії газу в пористих середовищах із зосередженими джерелами; досліджено ефективність способів збору газу при роботі ПСГ; оцінено та досліджено збіжність побудованих ітераційних процедур; досліджено ефективність та точність побудованих алгоритмів шляхом апробації результатів у практичних розрахунках на реальних даних. Об'єктом дослідження є процеси поширення газу в трубопроводах та фільтрації газу в пористих середовищах та сумісної роботи МГ і ПСГ.

Рух газу в складних системах трубопровідного транспорту описується, як правило, нелінійними системами диференціальних рівнянь та нелінійними емпіричними і напівемпіричними співвідношеннями. Загальна методика розрахунку режимних параметрів полягає у застосуванні варіаційних та ітераційних методів до побудови та розв'язування поставлених задач математичної фізики. Для цього використано: теорію функціонального аналізу та диференціальних рівнянь для обґрунтування існування і єдиності розв'язку задач; теорію похибок та обробки експериментальних результатів для аналізу меж невизначеності та оцінки точності числових результатів. Застосовано об'єктно-орієнтований підхід до програмної реалізації алгоритмів.

Ключові слова: підземне сховище газу, система магістральних газопроводів, рух газу в трубопроводі, природне пористе середовище, математичне моделювання, оптимізація параметрів.

Гладун С. В. Моделирование и расчет оптимальных параметров работы подземного хранилища газа в системе магистральных трубопроводов. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.05.02 – “Математическое моделирование и вычислительные методы”. – Национальный университет “Львівська політехніка”, Министерство образования и науки Украины, Львов, 2017.

В работе решено научно-практическое задание разработки и анализа математических моделей движения газа в трубопроводах и природных пористых средах и построения математической модели совместной работы газотранспортной системы и подземных хранилищ газа с целью оптимизации режимных параметров, построения методов и алгоритмов расчета гидродинамических параметров движения газа для построения расчетных схем газотранспортных сетей. Для достижения этой цели в диссертации были поставлены и решены следующие основные задачи: исследованы математические модели массопереноса в газопроводах и пористых средах и изучено влияние гидродинамических параметров газа и геометрических параметров трубопроводов и пластов подземных хранилищ газа на этот процесс; сформулированы задачи математической физики относительно нахождения распределения давления, температуры и массовой скорости газа в трубопроводах и пористых средах; разработаны алгоритмы и побудованы итерационные схемы решения нелинейных задач массопереноса и диффузии газа в пористых средах с сосредоточенными источниками; исследована эффективность способов сбора газа при работе подземных хранилищ газа; оценена и исследована сходимость построенных итерационных процедур; исследована эффективность и точность построенных алгоритмов путем апробации результатов в практических расчетах на реальных данных.

Объектом исследования является процесс распространения газа в трубопроводах и фильтрации газа в пористых средах и совместной работы магистральных газопроводов и подземных хранилищ газа. Движение газа в сложных системах трубопроводного транспорта описывается, как правило, нелинейными системами дифференциальных уравнений и нелинейными эмпирическими и полуэмпирическими соотношениями. Общая методика расчета режимных параметров заключается в применении вариационных и итерационных методов к построению и решения поставленных задач математической физики. Для этого использованы: теория функционального анализа и дифференциальных уравнений для обоснования существования и единственности решения задач; теория погрешностей и обработки экспериментальных результатов для анализа границ неопределенности и оценки точности численных результатов. Применен объектно-ориентированный подход к программной реализации алгоритмов.

Ключевые слова: подземное хранилище газа, система магистральных газопроводов, движение газа в трубопроводе, естественная пористая среда, математическое моделирование, оптимизация параметров.

Gladun S. V. Modelling and calculation of optimal operation parameters for Underground Storage Facility in trunk pipeline system. – On the rights of manuscript.

Thesis for candidate of technical sciences degree by specialty 01.05.02 – “Mathematical modelling and computational methods”. – Lviv Polytechnic National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2017.

In this work the following task is solved: development and analysis of mathematical models for gas flow in pipelines and natural porous media and development of mathematical model of gas transportation system joint operation with underground gas storage facilities in order to optimize the operational parameters, development of methods and algorithms of hydrodynamic gas flow parameters calculation for the gas transportation networks design schemes compilation. To achieve this goal following tasks were set up and solved in this thesis:

- Mathematical models of heat transfer in porous media and gas pipelines, and the effect of hydrodynamic parameters and geometric parameters of gas pipelines and underground gas storage layers on the process was studied;

- Tasks of mathematical physics with respect to the pressure distribution, temperature and mass velocity of the gas in the pipelines and porous media were formulated;

- Algorithms and iterative schemes for solving of nonlinear tasks of gas mass transfer and diffusion in porous media with concentrated sources were developed;
- The effectiveness of different gas collection methods during the operation of UGSF was studied;
- The convergence of developed iterative procedures was evaluated and studied;
- The effectiveness and precision developed algorithms were studied by the approbation of results in practical calculations using real data.

The object of research is the natural gas distribution processes in the pipelines and gas filtration in porous media and joint operation of trunk pipelines with underground storage facilities. Gas flow in complex pipeline transportation systems is described, as a rule, by non-linear systems of differential equations and non-linear empirical and semi-empirical relations. General method of operational mode parameters calculation is the application of variational and iterative methods to the development and solving of set mathematical physics tasks. Following was used for this purpose: a theory of functional analysis and differential equations for the explanation of existence and uniqueness of the tasks solution; theory of errors and experimental results processing for the analysis of the uncertainty boundaries and for the assessing of numerical results accuracy. Object-oriented approach to software algorithms implementation was used.

Key words: underground gas storage system, system of trunk pipelines, gas flow in the pipeline, natural porous media, mathematical modeling, optimization of parameters

Підписано до друку 06.04.2017 р.
Формат 60X84/16. Папір офсетний.
Друк цифровий. Умовн. друк. арк.. 0.9.
Наклад 100 прим. Зам. №68

ТзОВ «Растр»
79005, м. Львів, вул. Кн. Романа, 9/1
тел./факс: (032) 235-52-05
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:
ЛВ №22 від 19.11.2002 р.