

622.691.4

Т 91

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Тутко Тегяна Феліксівна

УДК 622.691.4.01:536.1 (043)

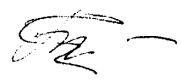
791

**АНАЛІТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕРМОГАЗОДИНАМІЧНИХ
ПРОЦЕСІВ У ГАЗОПРОВОДАХ І ЇХ ВЗАЄМОДІЯ З ДОВКІЛЛЯМ**

Спеціальність 05.15.13- Нафтогазопроводи, бази та сховища

ПІНВ

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук



Івано-Франківськ – 2002

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор **Грудз Володимир Ярославович**, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, завідувач кафедри спорудження та ремонту газонафтопроводів і газонафтосховищ.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор **Середюк Марія Дмитрівна**, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, завідувач кафедри транспорту і зберігання нафти і газу, м.Івано-Франківськ;

кандидат технічних наук **Говдяк Роман Михайлович**, голова правління ВАТ "Укргазпроект", м.Київ.

Провідна установа: ВАТ ІВП ВНІПТрансгаз, м.Київ

Захист відбудеться "18" лютого 2003р. о "10" год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 20.052.04 у Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу за адресою: 76019, м.Івано-Франківськ,

Е _____ науково-технічній бібліотечі Івано-Франківського технічного університету нафти і газу за адресою:

Загальна характеристика роботи

Актуальність теми. Для забезпечення економічної, надійної і безаварійної експлуатації магістральних газопроводів при мінімальному негативному їх впливі на довкілля необхідно застосовувати досконалі технологічні режими. Розробка таких режимів можлива при врахуванні більш точних даних про термогазодинамічні процеси, що відбуваються в трубопроводах при транспортуванні газу. Вказані дані можна отримати, розглядаючи і реалізуючи нові математичні моделі руху газу в трубах, які враховують всі основні фактори, що на нього впливають, на відміну від старих моделей, що характеризувалися певними спрощеннями. Такі спрощення раніше були вимушеними, оскільки без них математичні моделі не могли бути реалізованими.

Нові математичні моделі враховують вплив на термогазодинамічні процеси в газопроводах як всіх доданків газових рівнянь, так і температурного поля в ґрунті, знайденого при прийнятті до уваги теплової дії газопроводу і природної температури ґрунту як функції глибини його точок і часу. Вказані моделі дозволяють отримати нові, значно точніші результати при дослідженні термогазодинамічних процесів у трубопроводах, а тому їх застосування є актуальним.

Реалізація таких моделей, розроблених в дисертаційній роботі, стала можливою при застосуванні сучасних числових методів і існуючої комп'ютерної техніки. Отримані при реалізації результати мають як практичну цінність, так і сприятимуть розвитку термогазодинаміки газопроводів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота носить прикладний характер і входить в комплекс розробок АТ Укртрансгаз, спрямованих на підвищення ефективної і економічної експлуатації газотранспортного комплексу України і окреслених Національною програмою "Нафта і газ України до 2010 року".

Мета і задачі дослідження. Удосконалення методів математичного моделювання термогазодинамічних процесів у газопроводах.

Для досягнення поставленої мети були сформульовані такі задачі:

1. Математичне моделювання і дослідження температурного поля в складних газотранспортних системах, в яких газопроводи розглядаються як лінійні джерела тепла.
2. Визначення і дослідження температурного поля в складних газотранспортних системах, в яких нагрівання ґрунту на границях трубопроводів-ґрунт моделюється граничними умовами 3-го роду.
3. Математичне моделювання нестационарного теплового потоку для складних газотранспортних с



4. Математичне моделювання і дослідження нестационарних неізотермічних термогазодинамічних процесів у газопроводах.

5. Оцінка точності та адекватності запропонованих моделей при різному характері руху газу в трубопроводі.

Об'єкт дослідження – система магістральних газопроводів.

Предмет дослідження – нестационарні і квазістационарні процеси в газопроводах.

Методи дослідження. При математичному моделюванні і розв'язуванні поставлених задач використовувалися основи теорій: узагальнених функцій, інтегральних перетворень, структурного методу в поєднанні з варіаційним методом, методу характеристик. Для отримання числових результатів досліджень широко застосовувалася сучасна комп'ютерна техніка.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Вперше побудовані математичні моделі температурного поля складних систем магістральних газопроводів, в яких паралельні нитки розглядаються і як лінійні джерела тепла, і як такі, що нагрівають ґрунт за рахунок теплопередачі від газу через стінку труби (граничні умови 3-го роду на межі “газопровід-ґрунт”).

2. Математична модель нестационарного теплового потоку для однониткового газопроводу використана при побудові математичних моделей нестационарного теплового потоку для складних газотранспортних систем і розроблені методи їх реалізації.

3. Проведені дослідження нестационарного теплового потоку від нитки газопроводу, які дозволили оцінити його зміну в часі.

4. Вперше побудована і реалізована математична модель нестационарних неізотермічних термогазодинамічних процесів у газопроводі під час його пуску, коли рух газу в трубопроводі представлено системою диференціальних рівнянь у характеристичній формі.

5. Удосконалено математичну модель нестационарних неізотермічних термогазодинамічних процесів у газопроводі під час його зупинки при застосуванні рівнянь руху газу у характеристичній формі, що дозволило отримати якісно іншу фізичну картину стабілізації тиску і масової швидкості при цьому процесі.

Практичне значення одержаних результатів. Розв'язані в дисертації задачі, отримані результати і використані методики досліджень дозволяють ставити і розв'язувати різноманітні задачі, що пов'язані з дослідженням термогазодинамічних процесів в газопроводах при аварійних ситуаціях, включенні і виключенні компресорних агрегатів, включенні і виключенні буферних споживачів, тощо. Крім того, можна досліджувати термогазодинамічні процеси в трубопроводах, що протікають протягом дещо більших проміжків часу:

наприклад, термогазодинамічні процеси, що викликані добовою нерівномірністю споживання газу. В останньому випадку необхідно приймати до уваги зміни температури ґрунту навколо газопроводу.

З цією метою в роботі запропоновані два різних способи визначення потоку теплообміну між газопроводом і ґрунтом, в яких величина потоку визначається як з врахуванням зміни температури газу в газопроводі, так і зміни температури ґрунту навколо газопроводу. Ці способи рекомендується застосовувати при вивченні всіх плавних динамічних процесів у газопроводах.

Для визначення теплового впливу між нитками газопроводу (дві і більше ниток) і області прогрівання ґрунту рекомендується скористатися розв'язком задачі, в якій теплова дія ниток газопроводу замінена лінійними джерелами тепла.

Виконані дослідження дозволили створити “Методику розрахунку розподілення потоків газу в складних газотранспортних системах і підрахунку його запасу в трубах”, яка є керівним документом ДК “Укртрансгаз” НАК “Нафтогаз України”.

Особистий внесок здобувача. Автором дисертації виконана така робота:

1. Одержано аналітичний розв'язок задачі по визначенню природного температурного поля в ґрунті по вдосконаленій математичній моделі і після визначення параметрів закону зміни температури повітря для району м. Івано-Франківська досліджено температурне поле в ґрунті [7].

2. Визначено нестационарні температурні поля в ґрунті навколо двониткового газопроводу в результаті реалізації двох математичних моделей (перша модель – нитки газопроводу розглядаються як лінійні джерела тепла; друга модель – нагрівання ґрунту відбувається за рахунок теплопередачі через стінку труби з ізоляцією) з врахуванням природного температурного поля і проведено їх дослідження. Крім того, одержано розв'язок стаціонарної задачі теплопровідності в ґрунті навколо двониткового газопроводу структурним методом для випадку неврахування залежності природної температури ґрунту від часу [2,3,1].

3. Тепловий потік від кожної з ниток двониткового газопроводу знайдено в аналітичному вигляді і за допомогою температурного поля в ґрунті в місці контакту з газопроводом, проведено його дослідження [4].

4. Для вивчення термогазодинамічних процесів при нестационарному неізотермічному русі газу в газопроводі використано систему диференціальних рівнянь в характеристичній формі з врахуванням профілю траси. Побудовано математичну модель пуску газопроводу, після реалізації якої досліджено отримані результати [5,6].

Автор брала безпосередню участь у розробці та впровадженні у виробництво “Методики розрахунку розподілення потоків газу в складних газотранспортних системах і підрахунку його запасу в трубах”.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися:

- на школі-семінарі “Методи і засоби технічної діагностики” (Мізунь, 2001);
- на координаційній нараді з питань експлуатації магістральних газопроводів УМГ Прикарпаттрансазу (Івано-Франківськ, 2001);
- на науковому семінарі кафедри спорудження та ремонту газонафтопроводів і газонафтосховищ ІФНТУНГ (Івано-Франківськ, 2002);
- на науковому семінарі кафедри транспорту та зберігання нафти і газу ІФНТУНГ (Івано-Франківськ, 2002);
- на розширеному семінарі за спеціальністю 05.15.13 - Нафтогазопроводи, бази та сховища (Івано-Франківськ, 2002р.).

Публікації. По темі дисертації опубліковано 7 друкованих робіт і при цьому 5 у фахових виданнях України.

Структура і обсяг дисертації. Дисертація складається із вступу, 4-х розділів, підсумкових висновків, переліку використаних джерел, що містить 87 найменувань, та 6-ти додатків. Основний зміст викладено на 156 сторінках машинописного тексту, який містить 42 рисунки і 5 таблиць.

Основний зміст роботи

У вступі обґрунтована актуальність проведення нових досліджень термогазодинамічних процесів у газопроводах з урахуванням всіх основних факторів, що на них впливають, включаючи теплові втрати газопроводів, змінність у часі природної температури. Сформульовано мету і задачі досліджень, наведено перелік методів, що використовувалися для вирішення поставлених задач, відмічена наукова новизна, практичне значення отриманих результатів, а також їх апробація.

У *першому розділі* проведено аналіз наукових праць, присвячених визначенню термогазодинамічних параметрів руху газу, в тому числі і температури газу в трубопроводах, а також температурних полів ґрунту навколо газопроводів. При цьому наголошується на надзвичайній важливості вивчення температурного режиму роботи газопроводу, оскільки він пов'язаний з такими практичними проблемами як збільшення енерговитрат на транспортування газу, погіршення стійкості газопроводів, укладених у ґрунті, закупорка газопроводів газовими гідратами, неповне використання пропускної здатності газопроводів великих діаметрів і низкою інших. Крім того, відмічено, що температура газу в трубопроводі залежить в значній мірі від величини тепловіддачі в навколишній

грунт, а остання залежить від температурного поля навколо газопроводу.

Значний внесок у розвиток досліджень термогазодинамічних процесів у газопроводах зробили Р.Н.Бікчентай, С.А.Бобровський, Е.А.Бондарєв, О.Ф.Васильєв, А.Ф.Восводін, А.І.Гарляускас, А.А.Грачов, В.Я.Грудз, М.О.Жидкова, М.О.Каніболотський, Б.Л.Кривошеїн, Д.Ф.Тимків, І.Ю.Ходанович, С.І.Щербаков, Є.І.Яковлев та інші вчені.

На основі аналізу літературних джерел показано, що вивчалися в переважній більшості стаціонарні неізотермічні режими роботи газопроводів. При прогнозуванні нестационарних термогазодинамічних процесів у трубопроводах використовувалися спрощені математичні моделі. При визначенні стаціонарних і нестационарних температурних полів ґрунту навколо газопроводів природне температурне поле враховувалося тільки як функція глибини точок ґрунту. Задача визначення температурного поля навколо газопроводу і задача знаходження термогазодинамічних параметрів газу в ньому розглядалися окремо.

Вищенаведені задачі досліджень були сформульовані при врахуванні недоліків попередніх досліджень, проведених різними авторами, великого розповсюдження нестационарних режимів роботи газопроводів, а також можливостей сучасної комп'ютерної техніки.

У *другому розділі* проведено аналітичні дослідження теплового впливу газотранспортних систем на довкілля, зокрема вивчається температурне поле ґрунту, зумовлене системою паралельних газопроводів. При цьому спершу розглядаються різноманітні математичні моделі температурних полів навколо одно- і двониткових газопроводів, поставлена і розв'язана задача визначення природного температурного поля ґрунту як функції часу і глибини точок, знайдено стаціонарне температурне поле ґрунту навколо двох паралельних газопроводів при використанні структурного і варіаційного методів. І нарешті з метою дослідження теплового взаємовпливу між нитками газопроводу була сформульована і розв'язана задача для нестационарного температурного поля ґрунту, зумовленого двома лінійними джерелами тепла сталої і однакової потужності, які заміняють собою теплову дію газопроводів.

Оскільки розглядалися двониткові газопроводи, то використовувалися математичні моделі, область нагрівання ґрунту для яких зображена на рис.1 і рис.2.

Температура точок ґрунту записувалася у вигляді

$$T = T_1 + T_2, \quad (1)$$

де T_1 - природна температура точок ґрунту;

T_2 - температура точок ґрунту, викликана тепловою дією газопроводів чи лінійних джерел тепла.

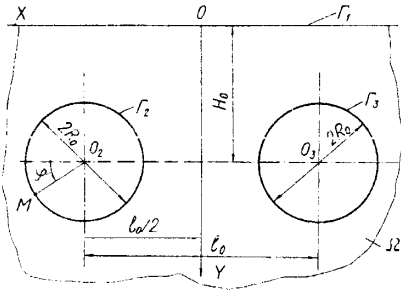


Рис.1. Область нагрівання ґрунту навколо двониткового газопроводу

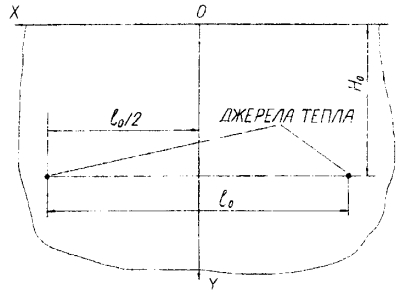


Рис.2. Ґрунт з двома лінійними джерелами тепла

Природну температуру ґрунту описує функція

$$T_1 = T_{cp} + \Gamma e^{\left(\frac{1}{h} + y\right)} + \frac{A h \exp(-\omega' y) \cos(\omega \tau - \varepsilon - \omega' y - \delta)}{\sqrt{(h + \omega')^2 + \omega'^2}}, \quad (2)$$

де T_{cp} , A - кліматичні характеристики для певного району;

ω, ε - параметри закону $T_{п}$ ($T_{п}$ - функція температури повітря);

$h = \alpha_{п} / \lambda_{г}$, $\omega' = \sqrt{\omega / (2a)}$, $\delta = \arctg(\omega' / (h + \omega'))$;

$\lambda_{г}, a, \alpha_{п}$ - коефіцієнти теплопровідності, температуропровідності ґрунту і тепловіддачі від ґрунту в повітря;

τ, y - час і глибина точок ґрунту;

Γe - геотермічний градієнт.

Визначення нестационарного температурного поля в ґрунті, зумовленого двома лінійними джерелами тепла, звелось до визначення температури T_2 , яка є розв'язком крайової задачі

$$\frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_2}{\partial y^2} = \frac{1}{a} \frac{\partial T_2}{\partial \tau} - \frac{q}{\lambda_{г}} \delta(y - H_0) \delta(x - l_0/2), \quad (3)$$

$$\left. \frac{\partial T_2}{\partial x} \right|_{x=0} = 0, \quad \left. \frac{\partial T_2}{\partial y} \right|_{y=0} = \frac{\alpha}{\lambda_1} T_{2|y=0}, \quad T_{2|x=0} = 0, \quad (4)$$

де x, y - координати точок ґрунту (див. рис.2);

l_0, \tilde{H}_0 - відстань між лінійними джерелами і глибина їх розміщення;

q - потужність лінійних джерел тепла, Вт/м;

$\delta(y - H_0), \delta(x - l_0/2)$ - дельта-функції Дірака.

Після знаходження нестационарної температури T_2 і переходу до границі $\tau \rightarrow \infty$ отримано аналітичний вираз для стаціонарного температурного поля ґрунту у вигляді:

$$T_2 = \frac{q}{\pi \lambda_1} \int_0^{\infty} \frac{\cos px \cos(pl_0/2)}{p} \left\{ e^{-p(y - H_0)} S(y - H_0) + e^{-p(H_0 - y)} \times \right. \\ \left. \times \left[1 - S(y - H_0) \right] + \frac{p - h}{p + h} e^{-p(H_0 + y)} \right\} dp, \quad (5)$$

де $S(y - H_0)$ - функція Хевісайда.

При нагріванні ґрунту лінійними джерелами тепла відбувається інтерференція температурних полів, створюваних кожним із джерел тепла, яка характеризується функцією теплового впливу δT_2 . Ця функція вказує на скільки градусів збільшиться температура в кожній точці ґрунту при одночасній дії обох джерел тепла у порівнянні з випадком, якщо б діяло тільки одне джерело тепла. Вона визначалася як для нестационарного, так і для стаціонарного температурних полів T_2 . У випадку стаціонарного температурного поля

$$\delta T_2 = \frac{q}{2\pi \lambda_1} \int_0^{\infty} \frac{\cos p(x + l_0/2)}{p} \left\{ e^{-p(y - H_0)} S(y - H_0) + e^{-p(H_0 - y)} \times \right. \\ \left. \times \left[1 - S(y - H_0) \right] + \frac{p - h}{p + h} e^{-p(H_0 + y)} \right\} dp. \quad (6)$$

Проводилися дослідження зміни природної температури ґрунту T_1 , температури T_2 і функції теплового впливу δT_2 . Параметри температури повітря, що входять у формулу (2), приймалися із косинусоїдального закону зміни температури повітря, для якого вони розраховувались на основі експериментальних даних (результатів багаторічних спостережень за температурою повітря в м. Івано-Франківську).

Аналізуючи отримані результати, було встановлено, що

- 1) коливання природної температури на глибині осей сучасних газопроводів ($H_0 = 1,5 \text{ м}$) є досить значним. Для району м. Івано-Франківська воно складає приблизно 12° C ;
- 2) при міжосьовій відстані двониткового газопроводу $l_0 = 20 \text{ м}$ і теплової потужності ниток $q = 100 \text{ Вт/м}$ величина теплового впливу δT_2 на область, що знаходиться поблизу нитки, зі сторони другої нитки не перевищує $0,25^\circ \text{ C}$ (для випадку стаціонарної температури T_2 , а при нестационарній температурі T_2 величина δT_2 буде меншою);
- 3) процес нагрівання ґрунту є досить інерційним процесом. Наприклад, за 400 год лінійне джерело тепла потужністю $q = 100 \text{ Вт/м}$ прогріває приблизно кругову область радіусом 2 м. При цьому в кожній точці цієї області температура T_2 збільшилась не менше ніж на 1° C .

Третій розділ присвячений аналітичним дослідженням теплової взаємодії газопроводів з ґрунтом і визначенню величини теплового потоку від паралельних ниток в ґрунт. Область нагрівання ґрунту представляє собою півплощину з двома отворами під газопроводи (див. рис. 1).

Математична модель плоскої задачі побудована на основі рівняння

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial \tau} \quad (7)$$

при таких крайових умовах:

$$T|_{\tau=0} = T_l(y, \tau)|_{\tau=0}; \quad \frac{\partial T}{\partial y}|_{y=0} = \frac{\alpha_{\text{п}}}{\lambda_i} (T - T_{\text{п}})|_{y=0}; \quad \frac{\partial T}{\partial v_i}|_{G_i} = -\frac{k_{\text{зп}}}{\lambda_i} (T_{\text{г}} - T)|_{G_i}, \quad i = 2, 3; \quad (8)$$

$y \geq 0, (y - H_0)^2 + (x \mp l_0/2)^2 \geq R_0^2$ (знак плюс в нерівності береться при $x < 0$, а мінус - при $x > 0$),

де $T_{\text{п}}, T_i$ - температури повітря і температура газу;

$k_{\text{зп}}$ - коефіцієнт теплопередачі від газу в ґрунт;

v_i - внутрішня нормаль на границі $G_i, i = 2, 3$.

Як і в розділі 2, температура T записувалася у вигляді (1), внаслідок цього задача звелася до знаходження певної безрозмірної температури $\theta(x, y, \tau)$

$$T_2(x, y, \tau) = T_i(0) \Theta(x, y, \tau) + \int_0^\tau \frac{\partial T_i(\tau - \zeta)}{\partial \tau} \Theta(x, y, \zeta) d\zeta, \quad (9)$$

де $T_i(\tau)$ - відома функція часу.

Температура θ визначалася методом суперпозиції. При цьому граничні умови 3-го роду введенням "додаткових шарів" ґрунту замінялися умовами 1-го роду, використовувалася безрозмірна система координат і наближений розв'язок осесиметричної задачі. Застосування методу суперпозиції виявилось можливим завдяки практичній відсутності теплового впливу другого газопроводу на область поблизу першого газопроводу, що було встановлено в розділі 2.

Величина теплового потоку від нитки газопроводу в ґрунт знаходилася двома способами. При першому способі визначалася середня температура ґрунту T по контуру контакту газопроводу з ґрунтом і після цього тепловий потік з 1м погонного труби

$$q = 2\pi R_0 k_{pr} (T_r - T_c). \quad (10)$$

Другий спосіб полягає в тому, що потік теплообміну записується через середнє значення похідної температури ґрунту в напрямі внутрішньої нормалі по контуру газопроводу. В результаті цього отримано аналітичний вираз для теплового потоку з 1м труби у такому вигляді:

$$q(\tau) = -\lambda_r R_0 \int_0^{2\pi} \left. \frac{\partial T}{\partial v_2} \right|_{r_2} d\varphi = 2\pi \lambda_r \left\{ T_i(0) q_w(\tau) + \int_0^\tau \frac{\partial T_i(\tau - \zeta)}{\partial \tau} q_w(\zeta) d\zeta + h A R_0^2 \omega'^2 e^{-\omega' H_0} \frac{\sin[\omega(\tau_1 + \tau) - \varepsilon - \omega' H_0 - \delta]}{\sqrt{(h + \omega')^2 + \omega'^2}} \right\}, \quad (11)$$

де q_w - безрозмірний тепловий потік, який знаходиться за допомогою безрозмірної температури;

R_0 - радіус отвору в ґрунті під газопровід;

τ_1 - кількість годин від початку року, що відповідає моменту пуску газопроводу.

Проводилися дослідження зміни як температурного поля навколо газопроводу, так і теплового потоку від нитки газопроводу. На рис.3 зображена залежність температури T у верхній точці контакту ґрунту з газопроводом ($x=10\text{м}, y=0,8\text{м}$) і природної температури ґрунту T_i у цій же точці як функції часу, починаючи від моменту пуску газопроводу. Порівняння графіків T і T_i показує, що температура T у великій мірі залежить від природної температури ґрунту. При обчисленнях температура газу в газопроводі була прийнята $T_r = 50^\circ \text{C}$.

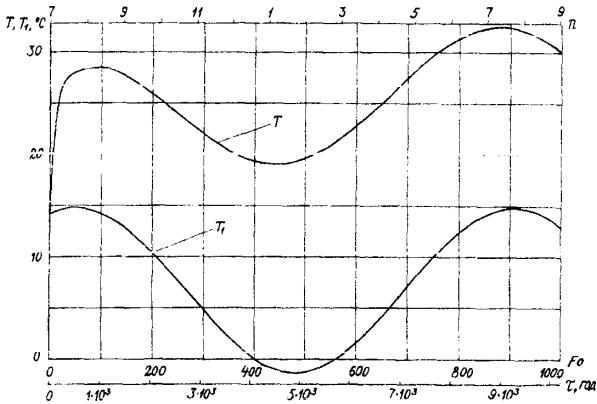


Рис. 3. Залежність температури T ґрунту в точці $x=10$ м, $y=0,8$ м і його природної температури T_0 від часу

На рис.4 зображено залежності $q(\tau)$ (криві 2 і 3) і $T(\tau)$ (крива 1), починаючи від моменту пуску газопроводу. Крива 2 побудована за формулою (11), а крива (3) – за формулою (10). Проведене додаткове дослідження показало, що формула (11) дає дещо завищені значення для $q(\tau)$, а формула (10) – навпаки, занижені. З рис.4 добре видно, що температура ґрунту T суттєво впливає на потік теплообміну q . Розглянуті способи визначення q потрібно використовувати при дослідженні довготривалих термогазодинамічних процесів у газопроводах.

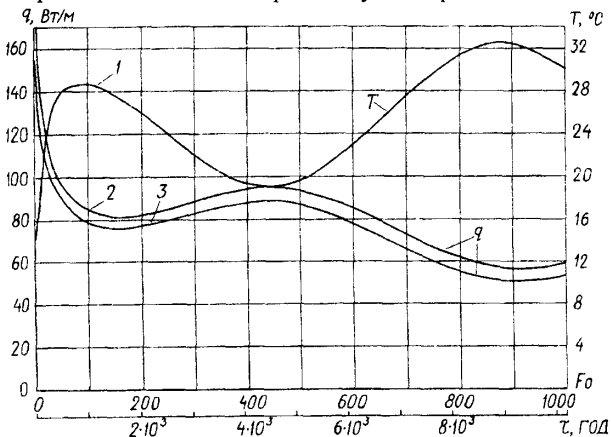


Рис. 4. Зміна теплового потоку від газопроводу в ґрунт і температури у верхній точці газопроводу залежно від часу

У четвертому розділі досліджуються нестационарні неізотермічні процеси в газопроводах, зокрема пускові режими газопроводів. Математична модель термогазодинамічного процесу побудована на основі газових рівнянь нерозривності, руху та енергії, які доповнювались рівнянням газового стану і калоричним рівнянням, що дозволило звести одержану систему до характеристичного вигляду

$$-\frac{dp}{d\tau} + C_1 \frac{dT_G}{d\tau} = D_1, \quad \frac{dm}{d\tau_+} + B_2 \frac{dp}{d\tau_+} + C_2 \frac{dT_G}{d\tau_+} = D_2, \quad (12)$$

$$\frac{dm}{d\tau_-} + B_3 \frac{dp}{d\tau_-} + C_3 \frac{dT_G}{d\tau_-} = D_3,$$

$$\text{де } C_1 = \frac{z_2 \chi p}{(\chi - 1) T_G}; \quad D_1 = \frac{z}{z_2} \left(\frac{4q^*}{D} + \rho \frac{\lambda v^3}{2D} \right); \quad B_{2,3} = \pm \frac{c \mp \chi v}{c^2};$$

$$C_2 = C_3 = \frac{mv}{z T_G}; \quad D_{2,3} = -\rho \left(g \sin \alpha + \frac{\lambda v^2}{2D} \right) \pm \frac{z(\chi - 1)}{z_2 c} \left(\frac{4q^*}{D} + \rho \frac{\lambda v^3}{2D} \right)$$

(верхній знак арифметичної дії відноситься до B_2 , а нижній - до B_3 , аналогічно і для $D_{2,3}$);

$$\frac{d}{d\tau} = \frac{\partial}{\partial \tau} + v \frac{\partial}{\partial x}, \quad \frac{d}{d\tau_+} = \frac{\partial}{\partial \tau} + (v + c) \frac{\partial}{\partial x}, \quad \frac{d}{d\tau_-} = \frac{\partial}{\partial \tau} + (v - c) \frac{\partial}{\partial x};$$

де p, T_G, m - тиск, температура газу і його масова швидкість;

x - координата вздовж осі трубопроводу;

ρ, v, c - густина газу, швидкість його руху і швидкість звуку в газі;

g, α - прискорення вільного падіння і кут нахилу осі трубопроводу до горизонту;

D - внутрішній діаметр трубопроводу;

q^* - потік тепла зовнішнього теплообміну, $\text{Вт}/\text{м}^2$;

λ, z - коефіцієнти гідравлічного опору і стисливості газу;

$z_2 = z + T_G \partial z / \partial T_G$; $\chi = c_p / c_v$;

c_p, c_v - теплоємності газу при сталому тиску і сталому об'ємі.

Реалізація побудованої математичної моделі для одноступового газопроводу дозволила оцінити технологічні параметри нестационарного неізотермічного процесу пуску магістрального газопроводу. При цьому в початковій точці

газопроводу встановлена компресорна станція, математична модель якої описується рівняннями

$$\varepsilon^2 = a - bQ^2, \quad T_{\text{вих}} = T_{\text{вх}} \varepsilon^{\frac{n-1}{n}}, \quad (13)$$

де $\varepsilon = p_{\text{вих}}/p_{\text{вх}}$; $p_{\text{вх}}, p_{\text{вих}}$ - тиск відповідно на вході в компресорну станцію і на виході з неї;

Q - подача газу в компресорну станцію;

$T_{\text{вх}}, T_{\text{вих}}$ - температури на вході і виході із компресорної станції; $n=1,31$, а масова швидкість газу в кінці ділянки $m=0$.

В розрахунках тиск і температура на вході в компресорну станцію вважалися сталими. Для визначення тиску $p(x, \tau)$, температури $T_T(x, \tau)$ і масової швидкості $m(x, \tau)$ як функцій лінійної координати і часу знаходилися диференціальні залежності на всіх трьох характеристиках, які замінялися різницевиими рівняннями. Останні розв'язувалися методом фіксованої сітки характеристик. За результатами розв'язку задачі були побудовані графіки $p(x), T_T(x)$ і $m(x)$ для різних моментів часу.

На рис.5 зображена залежність $T_T(x)$ для різних τ . Температура по довжині

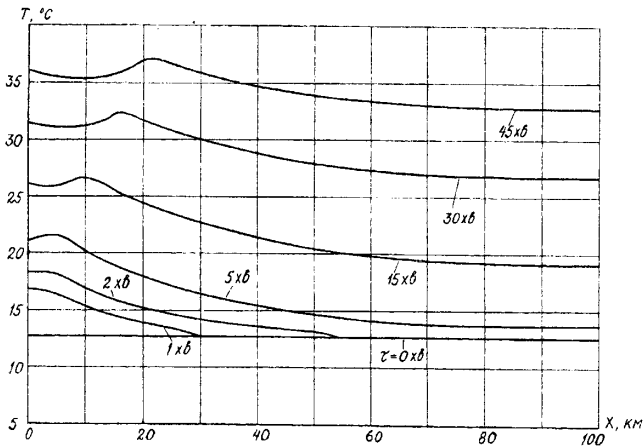


Рис. 5. Залежність температури газу T_T в трубопроводі від координати x його перерізів для різних τ

ділності газопроводу зменшується, але є наявним максимум температури, який зі збільшенням τ зміщується в сторону більшого x . Повна енергія газу є сумою потенціальної, кінетичної і внутрішньої або теплової енергій. В момент пуску газопроводу при зростанні швидкості газу починають зростати гідравлічні втрати. Робота сил тертя перетворюється в теплову енергію, яка не встигає передатися в навколишнє середовище. Тому спостерігається деяке підвищення температури газу. Цей тепловий максимум в подальшому переміщується з потоком газу.

Рівняння (12) використовувалися і для розв'язання задачі стабілізації тиску, температури і витрати газу при зупинці горизонтального газопроводу. Раніше ця задача розглядалася Б.Л.Кривошеїним, В.П.Радченком і М.Г.Хубларяном при нехтуванні зміною швидкості руху газу по координаті x газопроводу і по часу τ . Нами ж враховані всі доданки газових рівнянь.

На рис.6 наведені криві стабілізації масової швидкості газу за нашими результатами (суцільні лінії) і за результатами вказаних авторів (штрихові лінії). З рис.6 випливає, що масова швидкість визначена за результатами наших досліджень зменшується повільніше. Із збільшенням часу ця різниця зростає. Якщо при

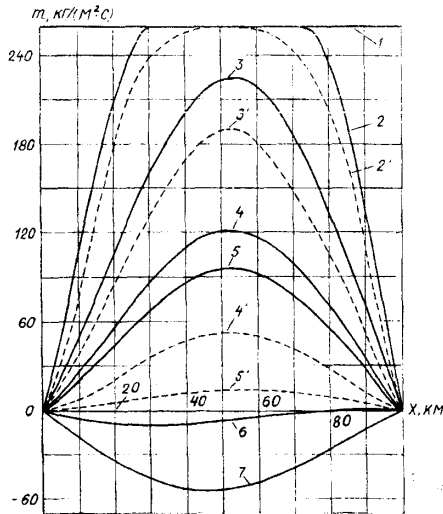


Рис. 6. Криві стабілізації масової швидкості газу (порівняння з результатами Кривошеїна, Радченка і Хубларяна)

1- $\tau=0$ хв; 2; 2'- $\tau=1$ хв; 3; 3'- $\tau=4$ хв; 4; 4'- $\tau=8$ хв;

5; 5'- $\tau=9$ хв; 6- $\tau=13$ хв; 7- $\tau=15$ хв

$\tau = 4$ хв найбільша різниця складає приблизно $37,2 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, то при $\tau = 9$ хв така ж різниця дорівнює приблизно $81 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$. За даними Б.Л.Кривошеїна, В.П.Радченка і М.Г.Хубляряна через $\tau = 10$ хв наступає повна стабілізація масової швидкості газу по всій ділянці газопроводу.

В той же час криві 6 і 7 показують, що при $\tau = 13$ хв і 15 хв стабілізація масової швидкості не наступає, а виникає рух газу в зворотному напрямі. При цьому масова швидкість руху газу в зворотному напрямі з часом зростає до певної величини, а потім зменшується. Тобто рух газу в ділянці газопроводу після перекриття її граничних перерізів має затухаючий коливний характер. А це означає, що математична модель, яка була прийнята цими авторами неповністю адекватно описує фізичні процеси, що відбуваються в ділянці газопроводу при її зупинці.

В розглянутих останніх двох задачах температура ґрунту навколо газопроводу приймалася незмінною, оскільки фізичні процеси, які досліджуються в цих задачах, відносно короточасні і температура ґрунту за такі проміжки часу суттєво не змінюється. При дослідженні більш довготривалих термогазодинамічних процесів у трубопроводах (декілька годин і більше) тепловий потік від газопроводу в ґрунт треба визначати або за формулою (11) або (10). Користування формулою (10) вимагає розглядати термогазодинамічні процеси в трубопроводах і температурну задачу ґрунту взаємопов'язано.

Висновки

1. На основі аналітичних досліджень термогазодинамічних процесів у магістральних газопроводах і їх системах, а також нестационарного теплообміну з навколишнім середовищем розв'язано важливу науково-технічну задачу прогнозування пускових режимів газопроводів та їх температурного впливу на навколишнє середовище.

2. Розроблено математичні моделі температурного поля в ґрунті для складних систем магістральних газопроводів, в яких паралельні нитки розглядаються як лінійні джерела тепла, і як такі, що нагрівають ґрунт за рахунок теплопередачі від газу. Застосовані методики реалізації створених математичних моделей дозволили побудувати нестационарні температурні поля в ґрунті навколо складних газотранспортних систем, які визначають взаємовплив між газопроводами і навколишнім середовищем – ґрунтом. Цей вплив необхідно враховувати при дослідженні термогазодинамічних процесів у трубопроводах.

3. Побудовані математичні моделі нестационарного теплового потоку для складних газотранспортних систем і розроблені методи їх реалізації. Аналіз

отриманих результатів показав, що при реальних віддальх між паралельними нитками газопроводів вплив однієї з ниток на температурне поле поблизу іншої нитки газопроводу не перевищує $0,25^{\circ}\text{C} \dots 0,5^{\circ}\text{C}$ при тепловій потужності нитки газопроводу $100 \dots 200 \text{ Вт/м}$. Тому при практичних розрахунках теплових потоків взаємовпливом між нитками можна знехтувати.

4. Використання функцій тиску $p(x, \tau)$, температури $T_r(x, \tau)$, отриманих при дослідженні термогазодинамічних процесів у газопроводах, для визначення кількості газу в газопроводі показує, що для квазістаціонарних процесів застосування запропонованих в роботі моделей визначення вказаних термодинамічних величин вносить поправку в результати, що не перевищує 0,5%, а для нестационарних технологічних режимів ця поправка суттєво зростає (до 10%). Крім того, застосування вказаних математичних моделей для визначення функцій тиску, температури і масової швидкості при зупинці газопроводу дозволило на відміну від існуючих моделей отримати фізичну картину процесу, яка адекватна реальній.

5. В результаті реалізації математичної моделі пускового режиму магістрального газопроводу встановлено, що термогазодинамічний процес в трубопроводі характеризується значною нестационарністю температурних і газодинамічних параметрів, при цьому температура газу як функція лінійної координати, має максимум величиною до 4%, який з часом переміщується в напрямі руху газу.

6. На основі створених математичних моделей і методів їх реалізації розроблено "Методику розрахунку розподілення потоків газу в складних газотранспортних системах і підрахунку його запасу в трубах", яка затверджена як керівний документ ДК "Укртрансгаз".

Основний зміст дисертації викладений у наступних публікаціях:

1. Тутко Т.Ф. Математичне моделювання теплової взаємодії газопроводу з навколишнім середовищем //Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. Серія : Транспорт і зберігання нафти і газу.- 1999.-Вип.36(т.5).- С.74-80.
2. Тутко Т.Ф. Теплові режими газопроводів. В кн.: Трубопровідний транспорт газу // М.П.Ковалко, В.Я.Грудз, В.Б.Михалків та інш.- Київ: Арена Еко, 2002.-С.157-179.
3. Грудз В.Я., Тутко Т.Ф. Нестационарне температурне поле в ґрунті навколо двох паралельних газопроводів //Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. Серія : Розробка та експлуатація нафтових і газових

- родовищ.- 2001.-Вип.38(т.3).-С.161-172.
4. Грудз В.Я., Тутко Т.Ф. Визначення потоку теплообміну між газопроводом і ґрунтом //Наук.вісник Івано-Франків.національного техн. ун-ту нафти і газу.- 2001.-№1-С.72-75.
 5. Тутко Т.Ф. Система характеристичних рівнянь нестационарного неізотермічного руху газу в негоризонтальних трубопроводах// Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. Серія : Методи і засоби технічної діагностики.- 2001.-Вип.38(т.8).-С.193-200.
 6. Грудз В.Я., Тутко Т.Ф. Пускові динамічні параметри газу на дільниці магістрального газопроводу //Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. Серія : Транспорт і зберігання нафти і газу.- 2001.-Вип.38(т.5).- С.45-61.
 7. Грудз В.Я., Тутко Т.Ф. Природне температурне поле верхніх шарів ґрунту //Матеріали 6-ої Міжнародної науково-практичної конференції “Нафта і газ України -2000”, т.3.- Івано-Франківськ : Факел,2000.-С.10-14.

АНОТАЦІЯ

Тутко Т.Ф. Аналітичне дослідження термогазодинамічних процесів у газопроводах і їх взаємодія з довкіллям. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.15.13 – Нафтогазопроводи, бази та сховища. Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. Івано-Франківськ, 2002.

Робота присвячена визначенню і дослідженню термогазодинамічних процесів у системі двох паралельних газопроводів. Побудовані математичні моделі дають можливість врахувати всі види термогазодинамічних втрат енергії, в тому числі і потік теплообміну між газопроводами і ґрунтом. Показано, що для короткочасних динамічних процесів у газопроводах температуру точок ґрунту можна приймати незмінною, оскільки температура ґрунту під впливом теплової дії газопроводів змінюється відносно повільно. Для динамічних процесів, що протікають протягом більших проміжків часу, необхідно враховувати зміну температурного поля в ґрунті. Розглянуто температурне поле в ґрунті навколо двох паралельних газопроводів і запропоновано способи визначення теплового потоку між газопроводом і ґрунтом. Встановлено, що на температурне поле навколо газопроводу і на тепловий потік від газопроводу суттєво впливає природне температурне поле ґрунту, яке розглядається як функція глибини його точок і часу.

Визначено тиск, температуру і масову швидкість газу під час пуску

газопроводу і при його зупинці. Отримані результати, що відповідають зупинці газопроводу, порівнювалися з відомими результатами, які були знайдені при певних спрощеннях математичної моделі. Дана оцінка точності і адекватності моделей.

Ключові слова: *термогазодинамічні процеси, газопровід, температурне поле, тепловий потік.*

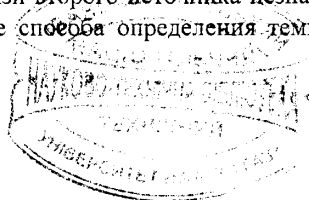
АННОТАЦИЯ

Тутко Т.Ф. Аналитическое исследование термогазодинамических процессов в газопроводах и их взаимодействие с окружающей средой. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.15.13 – Нефтегазопроводы, базы и хранилища. Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа. Ивано-Франковск, 2002.

Работа посвящена определению и исследованию термогазодинамических процессов в системе параллельных газопроводов. Проведенный анализ литературных источников по данной проблеме показал, что использованные ранее математические модели термогазодинамических процессов, протекающих в магистральном газопроводе, во многих случаях упрощены, а это неизбежно ведет к получению результатов исследования, не вполне совпадающих с реальностью.

На термогазодинамические процессы в газопроводах существенное воздействие оказывают тепловые потери газопроводов. Поэтому было выполнено аналитическое исследование теплового влияния газотранспортной системы на окружающую среду, которое позволило установить температурное поле грунта, обусловленное системой двух параллельных газопроводов, при теплообмене между газопроводами и грунтом по закону Ньютона (граничные условия третьего рода). Предварительно изучалось естественное температурное поле грунта, поскольку оно существенно влияет на температурное поле грунта вокруг газопроводов и на величину тепловых потерь от газопроводов в грунт. Кроме того, определено температурное поле грунта при действии двух линейных одинаковых источников тепла, заменяющих собой газопроводы. Установлено, что существует интерференция между температурными полями, создаваемыми линейными источниками тепла в грунте, а следовательно и между температурными полями, создаваемыми газопроводами. Но оказалось, что влияние одного источника тепла на температурное поле вблизи второго источника незначительно. Этот результат использован при разработке способа определения температурного поля грунта



вокруг двух параллельных газопроводов.

Предложены два метода определения теплового потока между газопроводом и грунтом. В первом случае тепловой поток определяется с помощью средней температуры грунта по контуру его контакта с газопроводом. Во втором случае получена аналитическая формула для теплового потока, найденная через среднее значение производной температуры в грунте в направлении нормали по контуру газопровода.

Построенные математические модели дают возможность учесть все виды термогазодинамических потерь энергии в газопроводах, в том числе и поток теплообмена между газопроводами и грунтом. Показано, что для кратковременных динамических процессов в газопроводах температуру точек грунта можно считать неизменной, так как температура грунта под тепловым воздействием газопроводов изменяется сравнительно медленно. Для динамических процессов, протекающих в течение больших промежутков времени, необходимо учитывать изменение температурного поля в грунте.

Определены давление, температура и массовая скорость газа в периоды пуска газопровода и его остановки при использовании построенных математических моделей, в которых газодинамические уравнения приведены к характеристическому виду, допускающему эффективный числовой метод их решения. Установлены закономерности изменения давления, температуры и массовой скорости газа во время пуска и остановки газопровода. Результаты исследования, полученные для остановки газопровода, сравнивались с известными результатами, найденными при определенных упрощениях математической модели. Получена качественно новая картина стабилизации давления и массовой скорости газа при остановке газопровода, адекватная реальному физическому процессу.

Ключевые слова: *термогазодинамические процессы, газопровод, температурное поле, тепловой поток.*

THE SUMMARY

Tutko T.F. Analytical research thermal and gas dynamic of processes in gas pipelines and their interplay with environment. - Manuscript.

Thesis on competition of a scientific degree of the candidate of engineering science on a speciality 05.15.13 – Petroleum and gas pipe, base and storehouse. Ivano-Frankivsk national technical university of oil and gas. Ivano-Frankivsk, 2002.

The activity is dedicated to definition and research thermal and gas dynamic of

processes in a system of two parallel gas pipelines. The constructed mathematical models enable to take into account all kinds thermal and gas dynamic of energy losses, including a flow of thermoexchange between gas pipelines and soil. Is rotined, that for short-lived dynamic processes in gas pipelines it is possible to consider(count) temperature of points of a soil invariable, as temperature of a soil under influencing of thermal effect of gas pipelines changes rather slowly. For dynamic processes which are flowing past during large periods, it is necessary to allow for change of a temperature field in a soil. The temperature field in a soil around of two parallel gas pipelines is reviewed and the methods of definition of a heat flow between the gas pipeline and soil are offered. Is established, that the temperature field around of the gas pipeline and on a heat flow from the gas pipeline essentially is influenced by(with) a natural temperature field of a soil, which one is esteemed as a function of depth of his(its) points and time.

Are determined pressure, temperature and mass rate of gas in a starting time of the gas pipeline and at his(its) stop. The obtained outcomes conforming to a stop of the gas pipeline, were compared to known outcomes retrieved at definite simplifications of mathematical model. Dan an estimation of accuracy and adequacy of models.

Key words: *thermal and gas dynamic processes, gas pipeline, temperature field, heat flow.*

