

Міністерство освіти і науки України
Івано-Франківський національний технічний університет
нафти і газу

СТАСЮК РОМАН БОГДАНОВИЧ

УДК 621.622

**УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ ДІАГНОСТУВАННЯ
ВИТОКІВ З ГАЗОВИХ МЕРЕЖ**

05.15.13 – Трубопровідний транспорт, нафтогазосховища

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

м.Івано-Франківськ - 2015

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу, Міністерство 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 **Капцов Іван Іванович**,
завідувач кафедри експлуатації газових і теплових систем Харківського
національного університету міського господарства (м. Харків).
кандидат технічних наук, **Дацюк Андрій Володимирович**,
директор центрального диспетчерського департаменту ПАТ
“УКРТРАНСГАЗ” (м. Київ).

Захист відбудеться _____ 2015 року о ___ і на засіданні
спеціалізованої вченої ради Д 20.052.04 в Івано-Франківському
національному технічному університеті нафти і газу за адресою: 76019,
м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15.

З дисертацією можна ознайомитися у науково-технічній бібліотеці Івано-
Франківського національного технічного університету нафти і газу за
адресою: 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15.

Автореферат розісланий “ _____ ” 2015р .

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 20.052.04,
кандидат технічних наук, доцент

_____ Л.Д. Пилипів

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність проблеми. Україна за ступенем газифікації населення займає перше місце в Європі.. Така висока частка у в енергетичному балансі держави вимагає створення і раціональної експлуатації розгалуженої газової мережі як для магістрального транспорту газу (в тому числі і транзитного), так і розподільчих і міських газопроводів високого, середнього та низького тисків. Великі обсяги перекачування газового пального по газопроводах різних категорій призводять до значних втрат енергоносіїв, що знижує економічну ефективність використання газу та призводить до зростання ціни на газове паливо. Крім того, мають місце несанкціоновані відбори газу з газових мереж, що також має негативний ефект.

Газова мережа є останньою ланкою у системі забезпечення споживачів природним газом. В зв'язку з цим вона характеризується розгалуженістю газопроводів і наявністю великої кількості обладнання та запірної арматури. Крім того, для газової мережі характерний процес постійного розвитку, пов'язаний з розбудовою міст та населених пунктів, необхідністю газифікації соціальних та промислових об'єктів газоспоживання. Наслідком структури газових мереж є підвищення фізичних та комерційних втрат газу. Адже кожна одиниця обладнання чи арматури є потенційним об'єктом газових втрат, пов'язаних з витокami в атмосферу, кожен елемент газоспоживання є потенційним об'єктом збільшення комерційних втрат.

Значні терміни експлуатації газопроводів викликають старіння металу внаслідок корозійних процесів, що обумовлює появу малих витоків з трубопроводів. Особливо це актуальне для газових мереж низького та середнього тиску, для яких виявлення витoku газу може тривати значний період часу експлуатації. Така ситуація є неприпустимою як з економічної, так і з екологічної точки зору, оскільки малий витік газу важко зауважити, внаслідок чого загазованість може обіймати значну територію, а деяких випадках призвести до утворення газоповітряної суміші і вибуху, в результаті якого виникають суттєві економічні збитки та небезпека для людського життя.

З сказаного очевидно, що діагностика малих витоків з газових мереж відноситься до першочергових завдань експлуатації газового господарства.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Робота носить науково-прикладний характер і входить в комплекс тематичних планів НАК «Нафтогаз України», спрямованих на підвищення надійності експлуатації газотранспортних мереж і окреслених Національною програмою «Концепція розвитку, модернізації і переоснащення газотранспортної системи України на 2009 – 2015 рр.».

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є удосконалення контролю за втратами газу в газових мережах середнього і низького тисків на основі встановлення закономірностей процесів витікання газу і його фільтрації в ґрунті.

Для досягнення поставленої мети необхідна реалізація наступних задач досліджень:

- встановлення причин розбіжностей між величинами витрати витікання газу з газопроводу під тиском, визначеними на основі математичного моделювання процесу та шляхом проведення вимірювань;
- оцінювання впливу параметрів режиму процесу витікання газу на величину витрати і визначення коефіцієнту витрати;
- конкретизація закономірностей фільтрації витоків газу в навколишньому ґрунті та побудова ареалу загазованості;
- дослідження нестационарних процесів в газопроводах газових мереж для виявлення місць і величини витоків газу.

Об'єкт дослідження. Аварійні витокі газу з газопроводів та процеси, що їх супроводжують.

Предмет дослідження. Нестационарні газодинамічні процеси в газопроводах газових мереж, викликані появою малих витоків.

Методи дослідження. Аналітичні методи побудови і реалізації математичних моделей нестационарних процесів в газопроводах при виникненні витоків газу, експериментальні методи оцінки точності запропонованого методу визначення координати витоків, аналітичні дослідження аварійних ситуацій в газопроводах.

Положення, що захищаються: удосконалення аналітичних методів визначення витрати витоків газу при квазістационарних та нестационарних режимах, та дослідження його фільтрації в ґрунті.

Наукова новизна одержаних результатів. Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному:

- на основі аналітичних і експериментальних досліджень дано наукове трактування розбіжностей в методах визначення витрати витоків газу;
- запропоновано корегування аналітичних методів визначення витрати витоків газу на основі експериментальних досліджень процесу;
- проведено дослідження процесу фільтрації газу в ґрунті внаслідок появи витоків з газопроводу на протязі першої та другої фази нестационарної фільтрації і формування ареалу загазованості;
- досліджено вплив нерівномірності газоспоживання та підключення буферних споживачів на нестационарні процеси, викликані появою витоків газу з газопроводу.

Практична цінність отриманих результатів.

Внесення корективів в аналітичні методи розрахунку витрати витоків з газопроводу, формування ареалу загазованості та діагностування витоків за характером нестационарного процесу.

Особистий внесок здобувача. Основні положення та результати дисертаційної роботи одержані автором самостійно. Зокрема, в опублікованих роботах автором особисто:

- дослідження впливу температурного режиму газопроводів на ефективність транспорту газу газопроводами газових мереж [1,2];
- дослідження процесу витікання газу з газопроводу і внесення корективів в аналітичні методи прогнозування [2];
- дослідження процесу фільтрації газу в ґрунті при появі витоків з газопроводу і формування ареалу загазованості [3];
- оцінка матеріального балансу газопроводу в умовах нестационарного газоспоживання [4];
- на основі результатів дослідження нестационарних процесів в газопроводах газових мереж Б викликаних різними за характером збуреннями запропоновано класифікацію витоків газу [5];
- дослідження нестационарних процесів в газопроводах газових мереж [6].

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертації доповідались і обговорювались:

на 7 міжнародній науково-технічній конференції «Надежность и безопасность трубопроводного транспорта» – Полоцк, 2011

на Всеукраїнській науково-практичній конференції «Шляхи підвищення ефективності експлуатації трубопроводного транспорту нафти і газу та підготовка кадрів галузі», м. Івано-Франківськ, 2-3 вересня 2012 року.

на науково-технічних конференціях професорсько-викладацького складу Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу (Івано-Франківськ, 2011-2013);

на нараді фахівців НАК «Нафтогаз України» з питань науково-технічного співробітництва в галузі транспортування газу» (Яремче, 2012 р.).

В повному обсязі результати досліджень доповідались і обговорювались на засіданні кафедри спорудження та ремонту газонафтопроводів і газонафтосховищ та науковому семінарі факультету нафтогазопроводів в Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу (м.Івано-Франківськ, 2014 р.).

Публікації. За темою дисертації опубліковано шість наукових праць, з них п'ять у фахових наукових виданнях.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, підсумкових висновків, списку використаних джерел, який налічує 117 найменування. Основний зміст роботи викладено на 128 сторінці машинописного тексту.

ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі дана загальна характеристика проблеми, обґрунтовано актуальність тематики, охарактеризовано наукову новизну та практичну цінність досліджень, а також особистий внесок автора в їх проведенні

Перший розділ присвячено аналізу споживання газу в Україні, вивченню його втрат при транспортуванні і розподіленні, а також аналізу існуючих методів оцінки витрати витікання газу та його фільтрації в ґрунті.

Упродовж перших років незалежності обсяги споживання природного газу в Україні внаслідок загального згортання промислового виробництва, закриття нерентабельних підприємств і ряду інших чинників неухильно скорочувалось. Так, якщо у 2004 році було спожито 118,1 млрд. м³ газу, то у 2006 році — 70,4 млрд. м³ або майже на 40% менше. В подальшому внаслідок якісних змін і поживлення національної економіки споживання газу зростало й у 2008 році загалом по Україні склало 76,4 млрд. м³.

Населення, навпаки, збільшувало споживання газу, пік якого прийшовся на 2003 рік. Це пояснюється зростанням рівня газифікації житлового фонду, який у 2003 році становив близько 50%.

Втрати газу зумовлені цілою низкою чинників, основними з яких є:

- недоліки засобів вимірювання витрати газу та методів, які реалізують ці засоби;

- похибки приладів обліку газу та приладів визначення фізико-хімічних параметрів газу;

- використання побутових газових плит для опалення та гарячого водопостачання внаслідок порушень у роботі систем централізованого теплопостачання та гарячого водопостачання;

- пошкодження й аварії на газопроводах за умов, коли витоки газу не обліковані;

- вимірювання побутовими лічильниками витрат у разі неприведення об'єму газу до стандартних умов;

- недоліки в інших аспектах організації обліку витрат газу;

- незадовільна робота централізованого тепло- та гарячого водопостачання;

- фізична зношеність обладнання, що використовує газ.

Друга частина втрат газу не залежить від діяльності газових господарств і має об'єктивний характер.

Головними складовими цієї частини понаднормативних втрат є:

1. Незадовільна робота підприємств теплоенергетики, що забезпечують централізоване опалення житла та гаряче водопостачання.

2. Невідповідність норм споживання газу для населення його фактичному споживанню. Через зазначений фактор газові господарства постійно несуть значні втрати.

3. Використання лічильників газу роторного типу. Їх встановлено більше 950 тис. штук (або практично кожен п'ятий лічильник). Після 2-3

років роботи такі лічильники мають велику від'ємну похибку вимірювання об'єму спожитого газу. За розрахунками втрати газу з цієї причини становлять близько 100 млн. м³ на рік.

4. Втрати газу внаслідок втручання в роботу приладів обліку газу та самовільного підключення споживачів до системи газопостачання.

Фізичні втрати пов'язані з тим, що мережа газопроводів досить часто прокладена на ділянках із агресивними чи вологими ґрунтами, в місцях з підвищеним ризиком електрохімічної корозії тощо, унаслідок чого матеріал труб зазнає посиленого руйнування. Крім того, частина газопроводів, особливо у західних регіонах України, вже давно перевищила свій експлуатаційний термін.

Відомо, що в процесі експлуатації магістральних газопроводів виникають порушення герметичності, котрі проявляються у вигляді витікань газу різної інтенсивності, створюють загрозу забруднення навколишнього середовища та є потенційно небезпечними для виникнення відказів системи.

Питання оцінки втрат газу при транспортуванні підіймалися у працях Гончарука М. І, Капцова І. І, Середюк М. Д, Середюка О. І, Яковлева Є. І. й інших дослідників. В їх роботах дається статистична оцінка втрат газу по розподільних мережах України в цілому, встановлюються причини появи витоків, визначається величина витрати газу через корозійні пошкодження, розглядаються методи ліквідації аварійних ситуацій. Однак ряд питань статистичного характеру не можуть бути вирішені в загальному плані аналізу експлуатації розподільних систем і носять локальний характер, оскільки умови, в яких знаходяться газопроводи, можуть суттєво відрізнитися. Тому виникає необхідність у проведенні досліджень, пов'язаних із втратами газу з розподільних систем, що експлуатуються в різних умовах.

Аналіз літературних джерел з питань дослідження процесів витікання газів під тиском показав, що основні математичні моделі процесу базуються на законах класичної газодинаміки, зокрема законі збереження енергії та законі нерозривності потоку. Важливу роль в дослідженнях відіграють основні термодинамічні принципи (наприклад, перше начало термодинаміки) та закономірності газового стану (для ідеальних та реальних газів). Реалізація складних нестационарних неізотермічних моделей вимагає їх певного спрощення, що в кінцевому випадку може призвести до спотворення реальної картини фізичного процесу. Між тим в літературних джерелах відсутня оцінка ряду припущень (наприклад, впливу не ідеальності природного газу, відхилення процесу витікання від адіабатного та ін.), що може бути причиною серйозних похибок в кінцевому результаті досліджень.

Результати експериментальних досліджень, що приводяться в літературі, здебільшого одержані в промислових чи напівпромислових умовах при стравлюванні газу з ділянок магістральних газопроводів і тому не вирізняються строгим науковим підходом з урахуванням конкретних умов та відповідно похибок експерименту.

Порівняння результатів теоретичних та експериментальних досліджень процесу витікання газу під тиском показує суттєву відмінність результатів, зокрема витрати стравлюваного газу. При цьому вводиться поняття коефіцієнту втрати отвору, який є відношенням теоретично розрахованої витрати газу через отвір до її фактичної (вимірної) величини (по аналогії з процесом витікання рідин через отвори).

Однак, числові значення цього коефіцієнта різні автори (а також один автор в різних серіях досліджень) приводять суттєво різними. Це дає підстави стверджувати, що коефіцієнт витрати залежить від ряду параметрів, які різними авторами в різних серіях експериментів або не враховувалися, або враховувалися не коректно. Цей факт вимагає планування і проведення дослідів з оцінювання впливу різноманітних факторів на величину витрати газу, який витікає через отвір під тиском.

Слід приділити також увага впливу насадок (сопел) на характер і параметри процесу витікання газу. Результати таких експериментальних досліджень в літературі також відсутні. Між тим, продув очні свічки, що служать для стравлювання газу з газопроводів в атмосферу, власне являють собою насадки.

Зауважимо, що в результаті корозійних пошкоджень газопроводів газових мереж витоки газу внаслідок фільтрації в навколишньому ґрунті утворюють ареал загазованості. При цьому фільтраційний опір ґрунту має вплив на процес витікання газу через корозійний отвір і впливає на величину витрати витікання.

В літературних джерелах процес фільтрації газу в ґрунті розглядається лише частково: до моменту виходу газу на поверхню. Однак, для визначення величини втрат газу в результаті витікання через корозійні отвори суттєве значення має подальший процес, який починається від моменту появи газу на поверхні і триває практично до ліквідації витоку

За літературними даними витоки газу з газопроводів поділяють на великі та малі. Великі витоки газу мають вплив на технологічні параметри роботи газової мережі, і їх появу можна від слідкувати за замірами тиску і витрати газу в мережі. Малі витоки на параметри роботи газопроводів не впливають (внаслідок недостатньої чутливості вимірної техніки) і тому за зміною параметрів режиму встановлені бути не можуть.

Для газових мереж, параметри режиму роботи яких безперервно змінюються в часі в залежності від величини споживання газу, відслідкувати появу витоку газу надзвичайно складно.

Тому актуальною є задача оцінки величини витоку газу (великий чи малий) за параметрами режиму. Іншими словами, необхідно встановити для газопроводів газових мереж з якої відносної величини витік газу почне впливати на режим роботи системи.

Проведений аналіз літературних джерел дозволив сформулювати мету досліджень: удосконалення контролю за втратами газу в газових мережах

середнього і низького тисків на основі встановлення закономірностей процесів витікання газу і його фільтрації в ґрунті.

Другий розділ присвячено експериментальним дослідженням процесу витікання газу з ємності під тиском і внесенню корективів в теоретичні методи визначення витрати витоку.

Метою проведених досліджень є удосконалення методів прогнозування витрати витоків газу з технологічних об'єктів, встановлення причин розбіжностей у визначенні витрати газу аналітичними та витратомірними методами та внесення корективів в розрахункові залежності для адаптації прогнозних та фактичних даних.

Для проведення експериментальних досліджень процесу витікання газу з ємностей під тиском створено лабораторний стенд. Циліндрична ємність, розміщена у водяному термостаті, заповнювалась повітрям чи іншим газом за допомогою компресора до максимального тиску.. Тиск в ємності контролювався і реєструвався за допомогою манометра Н08ЕМО11ШТ 3051С з діапазоном вимірювання 25 Па до 13,8 МПа. Для вимірювання і запису температури в газовому середовищі використано термометр опору ТСП-1088. В ємність вмонтовано змінні насадки з отворами в тонкій стінці різної форми. Температура стіни на відстані 12мм від насадки вимірювалось і записувалось з допомогою термопари ТХА-2088. Вимірювання витрати витікання газу здійснювалось об'ємним методом на основі картограми запису падіння тиску в ресивері в процесі проведення досліду.

Класичними принципами в сфері дослідження процесу витікання газу під тиском слід вважати дослідження Чарного І.А. в яких запропоновано аналітичну основу математичного моделювання процесу, яка базується на рівнянні енергії. До видатних досліджень слід також віднести праці Ландау Л.Д., Лойцянского Л. Г, Степанова Г.Ю.,Черного Г.Г, Щербакова С. Г, Яковлева Є.І.,Абрамовича Г.Н., Campbell J.L., Kantola R., Lang F. A., Zielke W. У вказаних працях приведено результати досліджень термогазодинаміки процесу витікання, дано аналіз факторів, що мають вплив на протікання процесу, визначено границі критичного та докритичного витікання, запропоновано розрахункові формули та методики. Однак, реальний вплив параметрів процесу на витрату газу виявляється складнішим в порівнянні з прогнозованим теоретично. Тому фактична витрата витікання газу суттєво відрізняється від розрахункової, що спотворює прогнозовані розрахунки

В процесі дослідження її залежності витрати газу при витіканні від параметрів процесу приймаються наступні припущення:

- процес витікання газу вважається стаціонарним і адіабатичним, тобто таким, що протікає без теплообміну з довкіллям;
- лінійна швидкість газу в ємності в порівнянні з швидкістю витікання газу є несуттєвою, і нею нехтують;
- діаметр отвору в тонкій стінці вважається суттєво більшим від товщини стінки, внаслідок чого нехтують втратами енергії при витіканні.

- газ вважається ідеальним, внаслідок чого нехтують явищем нестисливості.

Виходячи з аналогій при витіканні рідин і газів, запропоновано ввести коефіцієнт витрати отвору для адаптації результатів розрахунку з фактичними даними, який визначається відношенням фактичної масової витрати витоків до теоретично розрахованої її величини. На рисунку 1 приведено його залежності від тиску і температури, побудовані на основі результатів експериментів і їх порівняння з теоретичними даними.

Припущення, покладені в основу отримання залежності масової витрати при витіканні газу з ємності через отвір в тонкій стінці, мають суттєвий вплив на результати моделювання процесу, оскільки реальна масова витрата значно відрізняється від розрахункової.

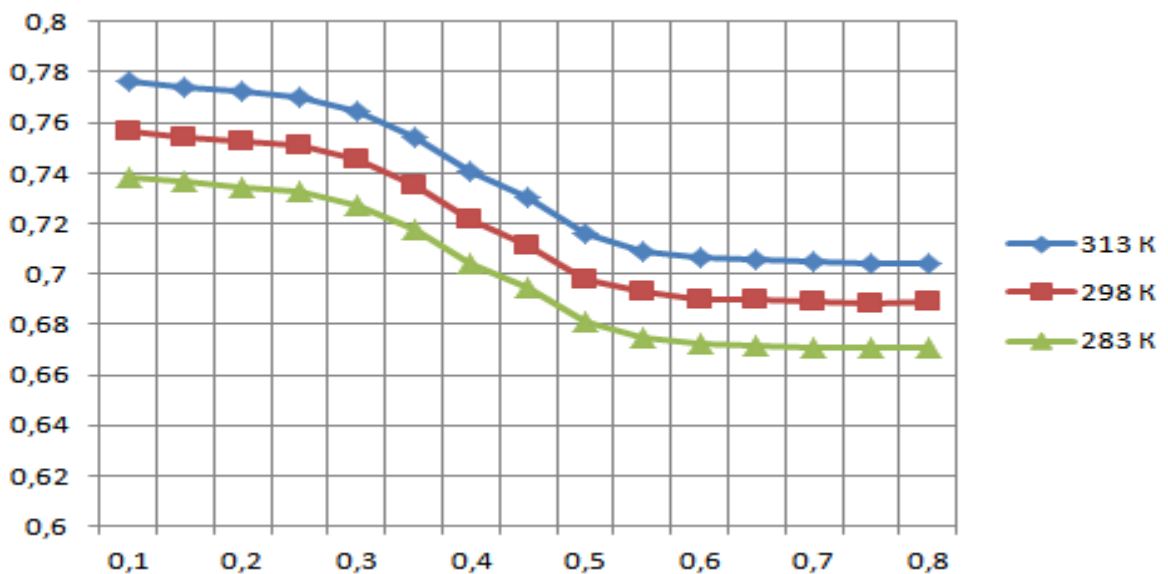


Рисунок 1 – Зміна коефіцієнта витрати витікання в залежності від тиску і температури

При зміні абсолютного тиску в ресивері від $1,0\text{МПа}$ до $0,54\text{МПа}$ (кінець зони критичного витікання) коефіцієнт витрати змінюється від 0,776 до 0,709 при температурі в ресивері 288К . Збільшення температури газу в ресивері приводить до більш суттєвого відхилення фактичної витрати від теоретичної. Тоді при температурі в ресивері 283К і тиску $1,0\text{МПа}$ коефіцієнт витрати складає 0,776, а при збільшенні температури до 298К знижується до 0,756 і при подальшому зростанні температури до 313К - зменшується до 0,738. При тиску $0,54\text{МПа}$ за температури 283К коефіцієнт витрати складає 0,709, а при зростанні температури до 298К зменшується до 0,696 і в подальшому при зростанні температури до 313К знижується до 0,678.

Для встановлення функціональної емпіричної залежності коефіцієнта витрати отвору від параметрів процесу витікання проводились серії дослідів і здійснювались їх обробка на основі методики раціонального планування

експерименту. У серіях проведених експериментів оцінювався вплив тиску і температури в ресивері, фізичних властивостей газу і діаметру отвору в заданих межах на величину коефіцієнта витрати отвору в умовах критичного та до критичного режимів витікання. В результаті отримано емпіричні залежності для коефіцієнту витрати отвору:

- для умов критичного режиму витікання

$$\mu = 0.285 \cdot d^{0.45} (R T)^{0.034} \exp(-0.0015P^2), \quad (1)$$

- для умов докритичного режиму витікання,

$$\mu = 0.582 \cdot (R T)^{0.025} P^{-0.11}, \quad (2)$$

де μ - коефіцієнт витрати отвору; R - газова стала, Дж/кгК.; T – абсолютна температура в ресивері, К; P - тиск газу в ресивері, бар.

Таким чином, встановлено, що причинами неадекватності математичної моделі слід вважати неврахування зростання газодинамічного опору середовища руху газової струмینی з великою лінійною швидкістю та зменшення густини газу в струміні внаслідок її розширення, а також припущення про ідеальність робочого тіла (газу), відсутність теплообміну в процесі витікання. Отримані на основі порівняння результатів теоретичних і фактичних досліджень поправки до формули Сен-Венана-Вентцеля дозволяють адаптувати модель до реальності в умовах докритичного та критичного режимів витікання газу.

В третьому розділі приведено результати дослідження фільтрації витоків газу з газопроводів в насколишньому ґрунті.

Для моделювання одомірної лінійної фільтрації неперервного середовища в пористому середовищі використано рівняння Дарсі. Другим класичним рівнянням, що виражає принцип збереження маси при русі неперервного середовища в пористому середовищі, є рівняння нерозривності, в якому джерело витоків інтенсивністю q розглядається як точкове джерело і моделюється за допомогою функції Дірака. В результаті математична модель має вигляд

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \right) - \alpha \frac{q}{F} \delta(x - x_g) \delta(y - y_g), \quad (3)$$

де ω - швидкість фільтрації як функція часу t і просторових декартових координат x, y ; α - коефіцієнт п'єзопровідності ґрунту.

На основі аналітичних досліджень встановлено, що загальний процес формування ареалу загазованості може бути розділений на дві нестационарні фази. Перша фаза починається з моменту виникнення витоків і закінчується

досягненням газом поверхні ґрунту. Для першої фази швидкість фільтрації на поверхні ґрунту за весь період рівна нулю. Друга фаза нестационарної фільтрації починається з моменту досягнення газом поверхні ґрунту і закінчується (при умові сталості інтенсивності джерела) переходом до стаціонарного процесу витікання газу через ґрунт в атмосферу.

При виборі початкових і граничних умов для першої фази вважалося, що в початковий момент часу фільтрація газу в ґрунті відсутня, поверхня ґрунту для газу непрониклива, а на безмежному віддаленні від джерела швидкість фільтрації дорівнює нулю, тобто

$$\omega(x, y, 0) = 0; \omega(0, h, t) = 0; \omega(\infty, h, t) = 0, \quad (4)$$

де h - глибина закладення газопроводу в ґрунті.

Поставлена задача розв'язувалась із застосуванням інтегральних перетворень, зокрема синус-перетворення Фур'є, і в результаті отримано розв'язок у вигляді

$$\begin{aligned} \omega = \frac{q}{2\pi F_0} \int_0^\infty \frac{\sin \lambda y_g \sin \lambda y}{\lambda} \left\{ \left[\sigma(x - x_g) - 1 \right] \left[e^{-\lambda(x_g - x)} \operatorname{erfc} \left(\frac{x_g - x}{2\sqrt{\alpha t}} - \lambda\sqrt{\alpha t} \right) - \right. \right. \\ \left. \left. e^{-\lambda(x_g - x)} \operatorname{erfc} \left(\frac{x_g - x}{2\sqrt{\alpha t}} + \lambda\sqrt{\alpha t} \right) \right] - \right. \\ \left. - \sigma(x - x_g) \left[e^{-\lambda(x - x_g)} \operatorname{erfc} \left(\frac{x - x_g}{2\sqrt{\alpha t}} - \lambda\sqrt{\alpha t} \right) - e^{-\lambda(x - x_g)} \operatorname{erfc} \left(\frac{x - x_g}{2\sqrt{\alpha t}} + \lambda\sqrt{\alpha t} \right) \right] \right\} d\lambda, \quad (5) \end{aligned}$$

де $\sigma(x - x_g)$ - одинична функція Хевісайда.

Для встановлення закономірностей формування поля швидкостей фільтрації газу в ґрунті проведено обчислювальний експеримент на основі створеної моделі. В результаті встановлено наступне.

При виникненні малих витоків газу з газопроводів низького тиску індикація їх на поверхні ґрунту можлива через короткий проміжок часу (5-10хв) в залежності від властивостей ґрунту. Ареал загазованості ґрунту витокami газу з газопроводу на глибинах, близьких до трубопроводу, займає поверхню, співрозмірну з розмірами траншеї. З наближенням до поверхні трубопроводу форма ареалу загазованості наближається до еліпса, велика вісь якого спрямована вздовж осі трубопроводу, а площа складає близько 40 м^2

Для другої фази нестационарного процесу формування ареалу забруднень витокami з газопроводу важливо оцінити характер закінчення формування ареалу загазованості ґрунту і величину витoku газу в атмосферу. Припустимо, що до початку дії джерела ($t = 0$) система знаходиться в спокої і тиск повітря у всіх точках площини внаслідок незначної глибини залягання був атмосферним $P(x, y, 0) = P_a$. Нехай в процесі дії джерела на поверхні ґрунту

і на значній віддалі від джерела тиск залишається атмосферним, тобто при $t > 0$ маємо $P(x, 0, t) = P_a$, $P(\omega, y, t) = P_a$.

Математична модель з приведеними початковими і граничними умовами реалізується методом інтегральних перетворень, зокрема використовується синус-перетворення Фур'є по змінній y і перетворення Лапласа по часу t . Розв'язок поставленої задачі розподілу тиску в паровому середовищі має вигляд

$$\begin{aligned}
 P(x, y, t) = P_a + \frac{q}{2\pi} \int_0^\infty \frac{\sin \lambda y_0 \sin \lambda y}{\lambda} \left\{ [\sigma(x - x_0) - 1] \left[e^{-\lambda(x_0 - x)} \operatorname{erfc} \left(\frac{x_0 - x}{2\sqrt{\alpha t}} - \lambda\sqrt{\alpha t} \right) - \right. \right. \\
 - e^{\lambda(x_0 - x)} \operatorname{erfc} \left(\frac{x_0 - x}{2\sqrt{\alpha t}} + \lambda\sqrt{\alpha t} \right) \Big] - \sigma(x - x_0) \left[e^{-\lambda(x - x_0)} \operatorname{erfc} \left(\frac{x - x_0}{2\sqrt{\alpha t}} - \lambda\sqrt{\alpha t} \right) - \right. \\
 \left. \left. - e^{\lambda(x - x_0)} \operatorname{erfc} \left(\frac{x - x_0}{2\sqrt{\alpha t}} + \lambda\sqrt{\alpha t} \right) \right] \right\} d\lambda.
 \end{aligned} \quad (6)$$

Для знаходження швидкості фільтрації газу в ґрунті як функції просторових координат і часу скористаємось плоским рівнянням Дарсі

$$\omega(x, y, t) = \frac{k}{2} \left(\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial P}{\partial y} \right). \quad (7)$$

В (7) градієнти тиску знаходяться шляхом диференціювання (6) по лінійних координатах.

На основі результатів досліджень з урахуванням реалізації запропонованої математичної моделі побудовано графіки, які обмежують границі ареалу загазованості для першої і другої фаз процесу нестационарної фільтрації газу. Вказані графіки для напрямку вздовж і поперек трубопроводу приведені на рисунку 2.

Аналіз результатів показує, що найбільший об'єм ареалу загазованості ґрунту займає на кінець першої фази нестационарної фільтрації газу в ґрунті. Це пояснюється наявністю певного фільтраційного опору ґрунту в період досягнення газом поверхні ґрунту. З наближенням до поверхні величина фільтраційного опору зменшується, що призводить до зростання поверхні ареалу загазованості.

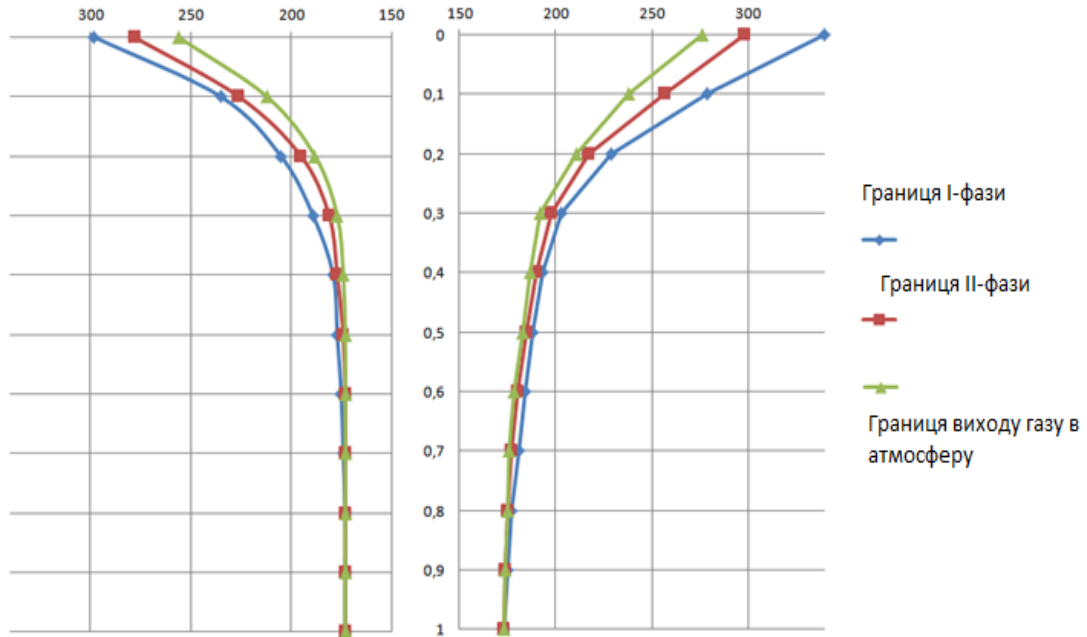


Рисунок 2 – Друга фаза нестационарної фільтрації газу

Після досягнення газом поверхні ґрунту фільтраційний опір різко зменшується, що призводить до зростання швидкості переходу газу з ґрунту в атмосферу. Внаслідок цього площа поверхні загазованості повинна зменшитися, а відповідно до принципу нерозривності, швидкості виходу газу в атмосферу – зрости

Четвертий розділ присвячено дослідження нестационарних процесів в газопроводах газових мереж, викликаних появою аварійних витоків та особливостями газоспоживання.

Газопроводи газових мереж, до яких також слід віднести підвідні газопроводи і газопроводи-колектори, як правило працюють в умовах нестационарного режиму внаслідок нерівномірності газоспоживання та режимами роботи буферних споживачів. Тому діагностичні задачі, які з успіхом вирішуються для умов магістральних газопроводів, в умовах газових мереж суттєво ускладнюються.

Вважається, що промислові споживачі газу рівномірно споживають газ протягом доби. Це твердження не завжди вірне, оскільки кількість спожитого газу як пального в промисловості визначається багатьма факторами, як, наприклад, нерівномірність постачання сировини, вимоги технологічного процесу до якості продукції та інше. Тому для промислових споживачів газу також існує добова нерівномірність газоспоживання, що може суттєво відрізнятися від нерівномірності споживання газу побутовими споживачами, яка визначається в основному укладом життя суспільства і пов'язаним із цим характером енергоспоживання. Якщо для певного регіону відома середньодобова величина Q_{cp} та добовий коефіцієнт нерівномірності газоспоживання k , то для погодинної витрати газу запропоновано залежність

$$Q(t) = Q_{cp} (1 + (1/k - 1) \sin \frac{\pi}{12} t) \quad (8)$$

Буферні споживачі можуть використовувати різні види енергоносіїв (в т.ч. і природній газ), їх використання в регіоні призводить до згладжування нерівномірності газоспоживання з одного боку та викликають стрибкоподібну зміну витрати в мережі внаслідок їх включення (відключення), що спричиняє нестационарність з іншого.

Таким чином, задача діагностування аварійних витоків з газопроводів газових мереж має за мету виокремити з сукупності нестационарних процесів такі, що викликані появою витoku.

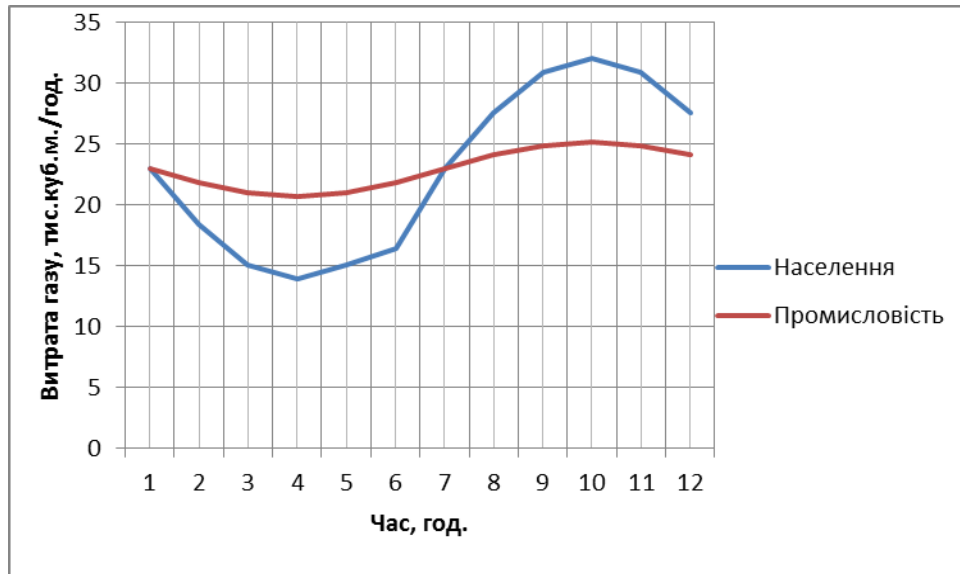
Зміна тиску в нестационарному процесі, викликаному в якості збурення появою витoku газу в точці з лінійною координатою x_1 зв'язана з величиною витoku q рівнянням

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} = \frac{2a}{c^2} \frac{\partial P}{\partial t} \mp \frac{2aq}{F} \delta(x - x_1) \quad (9)$$

Для реалізації (9) в якості початкової умови прийнято стаціонарний закон розподілу тиску в газопроводі газової мережі. Після початку нестационарного процесу на початку газопроводу тиск вважався сталим, а в кінці задавалася витрата газу, причому для моделювання впливу нерівномірності газоспоживання використано залежність (9), а для випадку включення (відключення) буферного споживача задавалася стрибкоподібна зміна витрати. В результаті реалізації поставлених задач для умов нестационарних процесів в газовій мережі Богородчанського управління з експлуатації газового господарства (УЕГГ) отримано графіки, приведені на рисунках 3 і 4. Їх аналіз дозволяє зробити висновки, які стосуються нестационарних процесів в газових мережах, викликаних появою аварійного витoku та характером газоспоживання. Якщо додатковим збуренням (крім появи витoku газу) виявилася нерівномірність добового газоспоживання то для цього випадку характерно наступне.

Технологічний режим роботи газопроводу вважається квазістаціонарним у тому випадку, якщо величина критерію нестационарності складає $N_i < 1,4 \cdot 10^{-6}$. В іншому випадку режим руху газу вважається нестационарним і зі зростанням величини критерію нестационарності ступінь нестационарності потоку збільшується.

а)



б)

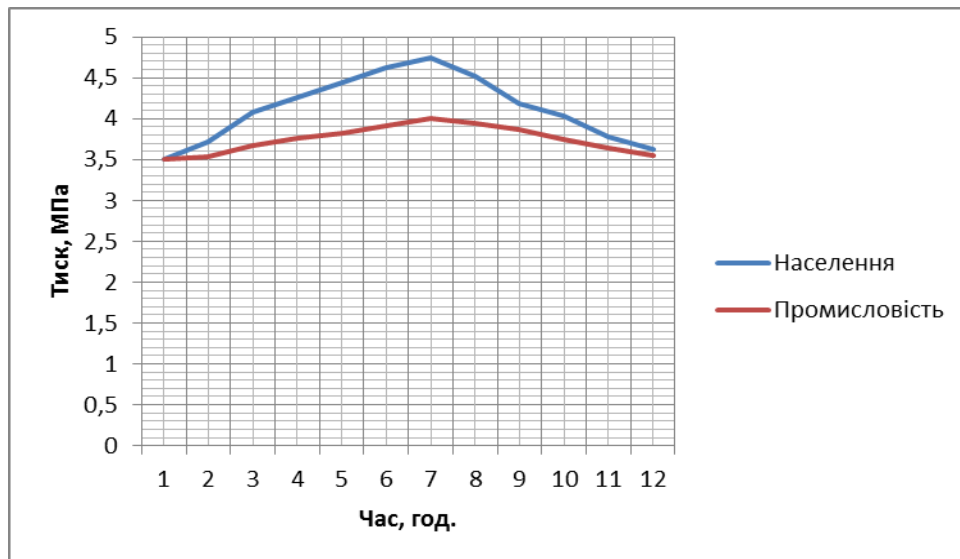


Рисунок 3 – Добова нерівномірність газоспоживання (а), та характер коливання тиску (б).

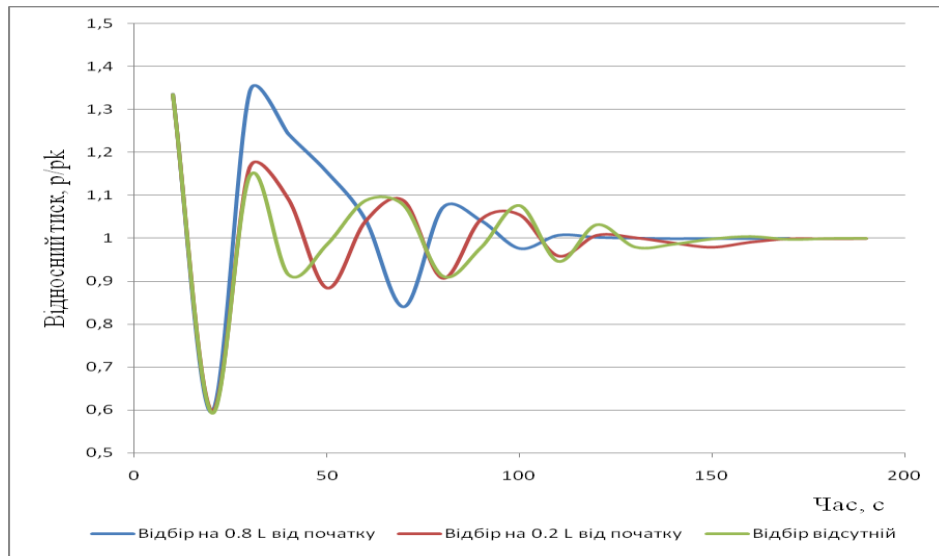


Рисунок 4 - Коливання тиску в газопроводі

Нерівномірність газоспоживання в межах зміни коефіцієнта нерівномірності від 0,7 до 1,0 практично не впливає на нестационарний процес в газопроводі, викликаний появою витоку газу, оскільки коливання тиску, викликані зазначеними збуреннями, відбуваються з суттєво різною частотою.

При низьких значеннях величини витрати витоку газу (до 7% від величини витрати газу в газопроводі) його поява практично не викликає збурення технологічного режиму, тому такі витоки слід вважати малими. Починаючи з відносної величини витрати витоку 8% його поява викликає коливання тиску на початку газопроводу, які можуть бути зафіксовані вимірювальними засобами, тому такі витоки слід віднести до великих.

Лінійна координата витоку відносно початку газопроводу не має суттєвого впливу на характер нестационарного процесу, викликаного його появою.

При різних значеннях відносної стрибкоподібної зміни витрати газу в точці підключення (відключення) буферного споживача газу $\delta Q_0 = (Q_0 - Q_1) / Q_0$ і при умові відсутності витоку газу ($q = 0$) за розв'язком (9) моделювався нестационарний процес, інтенсивність якого оцінювалася критерієм нестационарності $N_t = \delta Q d / \lambda w \tau$.

Після вказаної процедури проводилося моделювання нестационарного процесу в газопроводі, викликаного сумісним впливом стрибкоподібної зміни витрати газу в газопроводі і появою аварійного витоку газу. При цьому величина витрати витоку варіювалася в межах вибраного діапазону 5%-20%.

При кожному значенні величини витрати витоку на основі реалізації розв'язку і (9) визначалося відхилення нестационарного процесу за величиною зміни тиску у відповідні моменти часу. Якщо для даного значення величини витрати витоку відхилення між тисками перевищувало 5%, то такий витік вважався великим, і його вплив на характер

нестационарного процесу суттєвим. Описаний алгоритм дозволив побудувати графічну залежність величини граничної витрати витоку від критерія нестационарності.

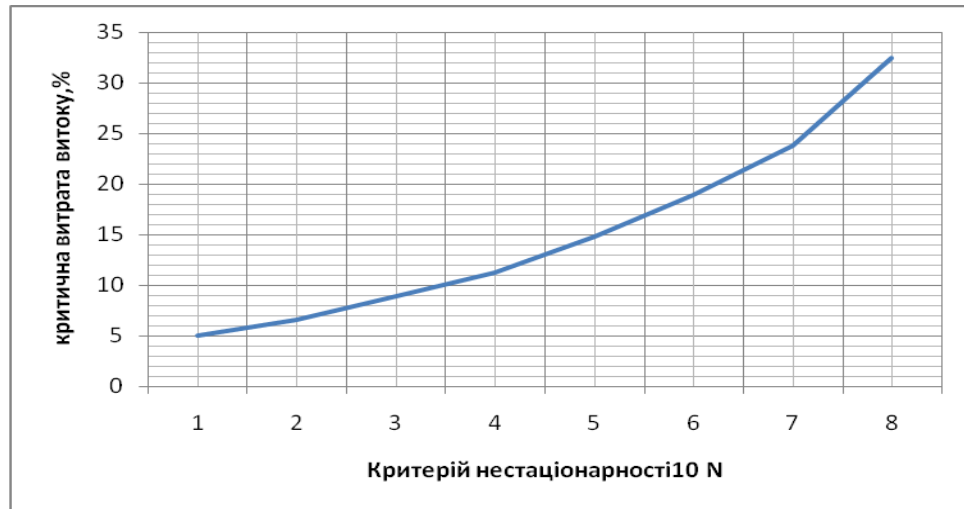


Рисунок 5 – Вплив нестационарності потоку газу на критичну величину витрати витоку

Як відомо, величина критерію нестационарності при стрибкоподібній зміні витрати газу за умови виникнення аварійних витоків для газових мереж складає $N_i = (4,5 - 5,0)10^{-6}$. Тому у відповідності до проведених досліджень критичну величину витрати витоку газу, перевищення якої суттєво вплине на характер нестационарного процесу, викликаного появою витоку за умови стрибкоподібної зміни витрати газу в газопроводі можна вважати рівною 13% -15% від початкової витрати газу.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ПІДСУМКОВІ ВИСНОВКИ

На основі проведених досліджень встановлено закономірності процесів витікання газу з газопроводів мереж низького та середнього тисків, а також фільтрації газу в навколишньому ґрунті, що дозволило удосконалити методи діагностування витоків із газопроводів, а саме:

1. На основі проведених експериментальних досліджень процесу витікання газу під тиском встановлено, що суттєві розбіжності у визначенні витрати витоку між прогнозними і фактичними даними пояснюються рядом неприйнятних припущень в аналітичних дослідженнях, і на основі встановлених закономірностей запропоновано залежність для компенсаційної поправки у вигляді коефіцієнта витрати отвору.

2. Показано, що процес формування ареалу загазованості ґрунту витоками з газопроводу можна розділити на дві фази нестационарної фільтрації газу, перша з яких починається з моменту появи витоку і закінчується досягненням поверхні ґрунту, і з цього моменту починається друга фаза, яка триває до встановлення стаціонарного витікання газу через

грунт в атмосферу. При виникненні малих витоків газу індикація їх на поверхні ґрунту можлива через короткий проміжок часу (5-10хв) в залежності від властивостей ґрунту, ареал загазованості ґрунту витоками газу на глибинах, близьких до трубопроводу, займає поверхню, співрозмірну з розмірами траншеї, а з підняттям до поверхні ґрунту його форма наближається до еліпса, а площа складає близько 40 м^2 ; після досягнення газом поверхні ґрунту фільтраційний опір різко зменшується, що призводить до зростання швидкості переходу газу з ґрунту в атмосферу, внаслідок чого площа поверхні загазованості зменшується.

3. Встановлено, що на характер нестационарних процесів в газовій мережі окрім збурень появою витоків газу мають вплив нерівномірність добового газоспоживання і режим споживання газу буферними споживачами. Показано що, якщо для даного регіону відомі середньодобова величина газоспоживання та коефіцієнт добової нерівномірності газоспоживання то запропоновано залежність, яка дозволяє відтворити погодинний характер газоспоживання. Нерівномірність газоспоживання в межах зміни коефіцієнта нерівномірності від 0,7 до 1,0 практично не впливає на нестационарний процес в газопроводі, викликаний появою витоку газу, оскільки коливання тиску, викликані зазначеними збуреннями, відбуваються з суттєво різною частотою.

4. При низьких значеннях величини витрати витоку газу (до 7% від величини витрати газу в газопроводі) його поява практично не викликає збурення технологічного режиму, тому такі витоки слід вважати малими. Починаючи з відносної величини витрати витоку 8% його поява викликає коливання тиску на початку газопроводу, які можуть бути зафіксовані вимірювальними засобами, тому такі витоки слід віднести до великих. Лінійна координата витоку відносно початку газопроводу не має суттєвого впливу на характер нестационарного процесу, викликаного його появою.

5. Нестационарні процеси в газопроводах газових мереж, за характером протікання яких можна діагностувати появу великих витоків, в значній мірі піддаються впливу стрибкоподібної зміни витрати газу. Для таких процесів у відповідності до проведених досліджень встановлено критичну величину витрати витоку газу, перевищення якої суттєво вплине на характер нестационарного процесу, викликаного появою витоку за умови стрибкоподібної зміни витрати газу в газопроводі, її можна вважати рівною 13% -15% від початкової витрати газу.

Основний зміст дисертації опубліковано в наступних виданнях:

1. Грудз Я.В. Дослідження впливу температурного режиму газопроводів на енергоефективність транспорту газу/ Я.В. Грудз, Н.Я. Дрінь, Р.Б. Стасюк, В.Д. Шологон // Нафтогазова енергетика. – Івано-Франківськ, 2011. – № 2. – С.43-47.
2. Grudz V.Ya. The research of gas leak from the / V.Ya. Grudz, Ya.V. Grudz, N.Ya. Drin, R.B. Stasiuk. // JOURNAL OF HYDROCARBON POWER ENGINEERING. – Ivano-Frankivsk, 2014. – № 2. – P.103-107.
3. Грудз В.Я. Математичне моделювання фільтрації газу в ґрунті внаслідок виникнення малих витоків в газопроводі/ В.Я. Грудз, Я.В. Грудз, В.В. Фейчук, Н.Я. Дрінь, Р.Б. Стасюк. // Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. – Івано-Франківськ, 2011. – №3 – С. 66-69.
4. Грудз В.Я. Дослідження процесу фільтрації газу в ґрунті при появі витоків з газопроводу/ В.Я. Грудз, Я.В. Грудз, Н.Я. Дрінь, Р.Б. Стасюк // Нафтогазова енергетика. – Івано-Франківськ, 2011. – № 1 – С. 70-74.
5. Грудз В.Я. Оцінка матеріального балансу газопроводу в умовах нестационарного газоспоживання / Н.Я. Дрінь, Р.Б. Стасюк. // Науковий вісник – Івано-Франківськ. 2012. – №2, – С.105-106.
6. Р.Б.Стасюк. Исследование нестационарных процессов в газопроводах газовых сетей/ – СИСТЕМЫ. МЕТОДЫ. ТЕХНОЛОГИИ, – г. Братск 2015, – № 1(25) – С. 139-136. **[фахове видання включене до міжнародної науково-метричної бази Scopus]**

АНОТАЦІЯ

Стасюк Р.Б. – Удосконалення методів діагностування витоків з газових мереж – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.15.13 - Трубопровідний транспорт, нафтогазосховища. Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. - Івано-Франківськ, 2015

Дисертацію присвячено удосконаленню методів діагностування витоків із газопроводів газових мереж низького та середнього тиску внаслідок корозійних пошкоджень стінок труб. Виконано дослідження впливу параметрів режиму на витрату витоку і внесено корективи в теоретичні розрахункові моделі. На основі досліджень фільтрації газу в ґрунті встановлено закономірності формування ареалу загазованості. Створено математичні моделі нестационарних процесів в газових мережах, викликаних появою витоку і характером газоспоживання, в результаті удосконалено методику діагностування.

Ключові слова: газова мережа, витрата газу, витік газу, діагностика, прогнозування.

ANNOTATION

Stasyuk R.B. - Improvement of methods of diagnosticating of sources from gas networks is Manuscript.

Dissertation on the receipt of scientific degree of candidate of engineering's sciences after specialty 05.15.13 - Pipeline transport, storages of oil and gas. Ivano-Frankivsk national technical university of oil and gas. Ivano-Frankivsk, 2015.

Dissertation is sanctified to the improvement of methods of diagnosticating of sources from the gas pipelines of gas networks of subzero and middle pressure as a result of corrosive damages of walls of pipes. Research of influence of parameters of the mode is executed on the expense of source and amendments are brought in theoretical calculation models. On the basis of researches of filtration of gas conformities to law of forming of natural habitat of gas contamination are set in soil. The mathematical models of transients are created in the gas networks caused by appearance of source and character of consumption of gas, methodology of diagnosticating is improved as a result.

Keywords: gas network, gas expense, gas source, diagnostics

АННОТАЦИЯ

Стасюк Р.Б. - Усовершенствование методов диагностирование утечек из газовых сетей. - Рукопись.

Диссертация на получение научной степени кандидата технических наук по специальности 05.15.13 - Трубопроводный транспорт, нафтехранилища. Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа. - Ивано-Франковск, 2015

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников и приложений

Диссертация посвящена усовершенствованию методов диагностирования истоков из газопроводов газовых сетей низкого и среднего давления в результате коррозионных повреждений стенок труб. Выполнено исследование влияния параметров режима на расход утечки и Внесены коррективы в теоретические расчетные модели. На основе исследований фильтрации газа в почве установлены закономерности формирования ареала загазованности. Созданы математические модели нестационарных процессов в газовых сетях, вызванных появлением истоки и характером потребления газа, в результате усовершенствована методика диагностирования.

Во введении дана общая характеристика проблемы, обоснована актуальность тематики, охарактеризованы научная новизна и практическая ценность исследований, а также личный вклад автора в их проведении

Первая глава посвящена анализу потребления газа в Украине, изучению его потерь при транспортировке и распределении, а также анализа

существующих методов оценки расходы утечки газа и его фильтрации в почве.

Известно, что в процессе эксплуатации магистральных газопроводов возникают нарушения герметичности, которые проявляются в виде утечек газа различной интенсивности, создают угрозу загрязнения окружающей среды и потенциально опасными для возникновения отказов системы.

Анализ литературных источников по вопросам исследования процессов утечки газов под давлением показал, что основные математические модели процесса базируются на законах классической газодинамики, в частности законе сохранения энергии и законе неразрывности потока.

Вторая глава посвящена экспериментальным исследованиям процесса утечки газа из емкости под давлением и внесению коррективов в теоретические методы определения расхода утечки.

Исходя из аналогий при истечении жидкостей и газов, предложено ввести коэффициент расхода отверстия для адаптации результатов расчета с фактическими данными, который определяется отношением фактической массовой расхода утечки к теоретически рассчитанной ее величины.

Таким образом, установлено, что причинами неадекватности математической модели следует считать не учет роста газодинамического сопротивления среды движения газовой струи с большой линейной скоростью и уменьшение плотности газа в струю вследствие ее расширения, а также предположение об идеальности рабочего тела (газа), отсутствие теплообмена в процессе утечки. Полученные на основе сравнения результатов теоретических и фактических исследований поправки к формуле Сен-Венана-Вентцеля позволяют адаптировать модель к реальности в условиях докритического и критического режимов утечки газа.

В третьем разделе приведены результаты исследования фильтрации утечек газа из газопроводов в окружающей почве.

Для моделирования одномерной линейной фильтрации непрерывного среды в пористой среде использовано уравнение Дарси. Вторым классическим уравнением, выражающим принцип сохранения массы при движении непрерывного среды в пористой среде, является уравнение неразрывности, в котором источник утечек интенсивностью рассматривается как точечный источник и моделируется с помощью функции Дирака.

На основе аналитических исследований установлено, что общий процесс формирования ареала загазованности может быть разделен на две нестационарные фазы.

В результате эксперимента установлено, что при возникновении малых утечек газа из газопроводов низкого давления индикация их на поверхности почвы возможна через короткий промежуток времени в зависимости от свойств почвы. Ареал загазованности почвы утечками газа из газопровода на глубинах, близких к трубопроводу, занимает поверхность, соразмерный с размерами траншеи. С приближением к поверхности трубопровода форма

ареала загазованности приближается к эллипсу, большая ось которого направлена вдоль оси трубопровода

Анализ результатов показывает, что наибольший объем ареал загазованности почвы занимает на конец первой фазы нестационарной фильтрации газа в почве.

Четвертый раздел посвящен исследованию нестационарных процессов в газопроводах газовых сетей, вызванных появлением аварийных утечек и особенностями газопотребления.

Газопроводы газовых сетей, к которым также следует отнести подводные газопроводы и газопроводы-коллекторы, как правило работают в условиях нестационарного режима вследствие неравномерности газопотребления и режимами работы буферных потребителей. Поэтому диагностические задачи, которые с успехом решаются для условий магистральных газопроводов, в условиях газовых сетей существенно усложняются.

Таким образом, задача диагностирования аварийных утечек из газопроводов газовых сетей имеет целью выделить из совокупности нестационарных процессов такие, какие вызванных появлением утечки.

Ключевые слова: газовая сеть, затрата газа, исток газа, диагностика.