

УДК 681.5.017 : 621.643.8

МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ВИТІКАННЯ ГАЗУ ІЗ ПІДЗЕМНОГО ГАЗОПРОВОДУ НА ОСНОВІ ГАЗОДИНАМІЧНОЇ ДРОСЕЛЬНОЇ СТРУКТУРИ

Ф. Д. Матіко, Г. Ф. Матіко

Національний університет "Львівська політехніка", вул. С. Бандери, 12, м. Львів, 79013,
тел. (032) 258-25-16

Представлено математичну модель процесу витікання газу із підземного газопроводу, що отримана завдяки поєднанню теорії опису дросельних структур, закону руху газів у пористих середовищах (закону Дарсі) та на основі результатів експериментальних досліджень газопроникності ґрунту, виконаних авторами. Модель дозволяє визначити площу витікання газу з урахуванням неоднорідності структури ґрунту як по висоті стовпа ґрунту, так і по площі витікання, дозволяє визначити значення тисків у вузлових точках вздовж газопроводу, значення витрати газу у кожній точці площі витікання та сумарну витрату витоку газу із підземного газопроводу по всій площі витікання. Модель пропонується для визначення об'єму витоку газу підчас ліквідації пошкоджень газопроводів та може служити основою для розробки методики визначення об'єму газу, втраченого через пошкодження підземних газопроводів.

Ключові слова: природний газ, об'єм витоку, підземний газопровід, модель витоку, дросельна структура, газопроникність ґрунту, пошкодження.

Представлена математическая модель процесса истечения газа из подземного газопровода, на основе совместного применения теории описания дросельных структур, закона движения газов в пористых средах (закон Дарси) и на основе результатов экспериментальных исследований газопрооницаемости ґрунта, выполненных авторами. Модель позволяет определить площадь истечения газа с учетом неоднородности структуры почвы как по высоте столба ґрунта, так и по площади истечения, позволяет определить значения давлений в узловых точках вдоль газопровода, значения расхода газа в каждой точке площади истечения и суммарный расход утечки газа из подземного газопровода по всей площади истечения. Модель предназначена для определения объема утечки газа во время ликвидации поврежденных газопроводов и может служить основой для разработки методики определения объема газа, потерянного из-за поврежденных подземных газопроводов.

Ключевые слова: природный газ, объем утечки, подземный газопровод, модель истечения, дросельная структура, газопрооницаемость ґрунта, повреждение.

A mathematical model of gas leakage from underground pipeline is presented. It is obtained due to a combination of the theory of description of throttle structures, the law of gas motion in porous media (Darcy law) and experimental studies of soil gas permeability carried out by the authors. The model allows determining an area of gas leakage taking into account the heterogeneity of soil structure both through the height of the soil column and in the leakage area. It also allows determining the pressure at nodal points along the pipeline, the value of gas flowrate at each point of the leakage area and the total flowrate of gas leakage from the underground pipeline across the leakage area. The model is proposed to determine the volume of gas leakage during the elimination of pipelines damages. It could be used as a base for development of methodology for determining the volume of gas lost because of the damages of underground pipelines.

Key words: natural gas, volume of leakage, underground pipeline, leakage model, throttle structure, gas permeability of soil, damage.

Газорозподільні мережі кожної газопостачальної організації складаються із сотень кілометрів трубопроводів різного способу прокладання (підземного, наземного). В процесі експлуатації газорозподільних мереж виникають пошкодження газопроводів,

внаслідок яких додатково втрачається газ і виникають понаднормативні втрати, що ведуть до збитків газорозподільних організацій.

В межах населених пунктів переважають підземні газопроводи, якими газ подається до кінцевих споживачів. Пошкодження підземних

газопроводів виникають як внаслідок механічної дії на них (виконання будівельних робіт, природні зміщення шарів ґрунту тощо), так і внаслідок дії техногенних факторів (конструктивних, виробничих, технологічних, експлуатаційних тощо) [1]. Поширеним прикладом дії техногенних факторів є корозійні пошкодження підземних газопроводів. Вони спричинені дією експлуатаційних чинників – внаслідок хімічного впливу ґрунту, ґрунтових вод та дією технологічних чинників, пов'язаних із недоліками технології при приготуванні і нанесенні ізоляційного покриття, підготовці ґрунтової підсіпки газопроводів.

При виявленні пошкоджень підземного газопроводу виникає необхідність оцінити об'єм витоку газу через ці пошкодження. Оцінка об'єму витоку часто повинна бути виконана після того, як підземний газопровід розкритий та відомі геометричні характеристики пошкоджень.

Відомі приладні методи визначення об'єму витоку газу із газопроводів, зокрема метод з використанням мобільного витратомірного комплексу [2]. Однак такі методи передбачають їх планове застосування. В окремих випадках (за умови виявлення витоків природного газу в технологічних колодязях, підвалах) витіки ліквідують без визначення об'єму витоку з використанням відповідних приладів. В інших випадках такі методи застосувати неможливо внаслідок того, що розподільні мережі технологічно не готові до цього. Тоді необхідно було б застосувати розрахункову методику, яка б дозволила обчислити об'єм витоку за умови, що геометричні характеристики пошкоджень відомі.

У діючих нормативних документах [3, 4] не запропоновано методики визначення об'єму газу, втраченого внаслідок пошкоджень газопроводів, в тому числі й підземних.

Метою дослідження є розробка математичної моделі процесу витікання газу із підземного газопроводу, яка в перспективі може стати основою методики розрахунку об'єму витоку газу через пошкодження підземного газопроводу.

Розглянемо математичну модель витікання газу із підземного газопроводу. Швидкість фільтрування газу v через ґрунт можна визначити за законом Дарсі, який для ізотропних гірських порід записують у такому вигляді [5]:

$$v = -\frac{C}{\mu} \text{grad} p, \quad (1)$$

де C – коефіцієнт проникності пористого середовища, м^2 ; μ – коефіцієнт динамічної в'язкості газу, $\text{Па}\cdot\text{с}$; $\text{grad} p$ – градієнт тиску на довжині фільтрації, $\text{Па}/\text{м}$.

На основі закону Дарсі отримують рівняння для визначення витрати газу через зразок ґрунту із відомою площею поперечного перерізу [6]:

$$Q = \frac{\tilde{N} \cdot F \cdot \Delta P}{\mu \cdot \Delta l}, \quad (2)$$

де Q – об'ємна витрата газу, $\text{м}^3/\text{с}$; F – площа фільтрації, м^2 ; ΔP – перепад тиску на довжині фільтрації Δl , Па ; Δl – довжина шляху фільтрації, м .

Застосування рівняння Дарсі можливе при умові, що відомий коефіцієнт газопроникності ґрунту. Авторами запропонована методика визначення газопроникності ґрунту [7], яка дозволяє визначити газопроникність сипких порід та експериментальним шляхом визначити значення коефіцієнта газопроникності для зразків порід, які застосовуються для засипки газопроводів – піску, глини, гравію та їх сумішей [7].

Однак навіть за умови, що відоме значення коефіцієнта газопроникності ґрунту, визначити витрату газу через пошкодження підземного газопроводу на основі закону Дарсі неможливо. При витіканні із підземного газопроводу газ поширюється не тільки через стовп ґрунту безпосередньо над отвором, а й через прилеглі шари. Тобто, площа пошкоджень газопроводу не дорівнює площі поширення газу в ґрунті, тому безпосередньо застосувати рівняння Дарсі не вдається.

Для визначення площі поширення газу та загальної витрати витікання газу через пошкодження підземного газопроводу авторами розроблена математична модель, у якій витікання газу через окремий (елементарний) стовп ґрунту розглядається як витікання через дросель, витрата газу через який визначається законом Дарсі. У випадку, якщо стовп ґрунту над пошкодженим газопроводом складається із шарів різних порід, він розглядається як складений дросель (послідовне з'єднання дроселів із різними проникностями).

Для багатьох випадків прокладання газопроводів стовп ґрунту над ними має двошарову структуру (пісок, глина), а в умовах міської забудови та прокладання вдовж доріг – тришарову (пісок, глина, гравій). Розглянемо випадок, коли стовп ґрунту над газопроводом має тришарову структуру (рис. 1): нижній шар – пісок, висотою шару H_{II} ; середній шар – глина,

висотою шару $H_{ГЛ}$; верхній шар – щєбінно-гравієва засипка, висотою шару $H_{ГР}$.

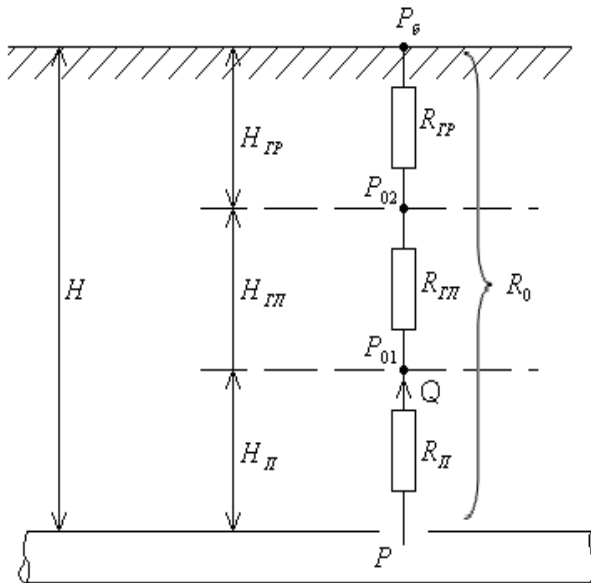


Рисунок 1 – Схема дросельної моделі стовпа ґрунту над пошкодженням газопроводу

Нехай елементарна площа пошкодження газопроводу становить F . Тоді витрата газу через шар піску (дросель) площею перерізу F , який знаходиться над пробоїною, становить

$$Q_i = \frac{\tilde{N}_i}{\dot{I}_i} \cdot \frac{F}{\mu} \cdot (P - P_{01}). \quad (3)$$

Витрата газу через шар глини та щєбінно-гравієвої засипки, відповідно, буде такою:

$$Q_{\bar{A}\bar{E}} = \frac{\tilde{N}_{\bar{A}\bar{E}}}{\dot{I}_{\bar{A}\bar{E}}} \cdot \frac{F}{\mu} \cdot (P_{01} - P_{02}), \quad (4)$$

$$Q_{\bar{A}\bar{D}} = \frac{\tilde{N}_{\bar{A}\bar{D}}}{\dot{I}_{\bar{A}\bar{D}}} \cdot \frac{F}{\mu} \cdot (P_{02} - P_d). \quad (5)$$

В рівняннях (3)÷(5) $Q_{П}$, $Q_{ГЛ}$, $Q_{ГР}$ – об'ємна витрата газу, що проходить через відповідний шар ґрунту (пісок, глину і гравій); $H_{П}$, $H_{ГЛ}$, $H_{ГР}$ – висота відповідного шару ґрунту; $C_{П}$, $C_{ГЛ}$, $C_{ГР}$ – коефіцієнти газопроникності відповідного шару ґрунту; F – сумарна площа отвору витіку газу; μ – коефіцієнт динамічної в'язкості природного газу; P – тиск газу у центрі витіку, який приймають рівним тиску газу у газопроводі; P_6 – барометричний тиск; P_{01} , P_{02} – тиски газу на межі відповідних шарів ґрунту (рис. 1).

Вважаючи, що дифузії газу через стінки елементарного циліндра (стовпа ґрунту), який досліджується, немає, отримуємо рівність витрат

$$Q_{П} = Q_{ГЛ} = Q_{ГР} = Q. \quad (6)$$

Витрата Q через три послідовні шари може бути визначена також рівнянням

$$Q = \frac{\tilde{N}}{\dot{I}} \cdot \frac{F}{\mu} \cdot (P - P_d), \quad (7)$$

де C – шуканий коефіцієнт газопроникності тришарового стовпа ґрунту; H – загальна висота стовпа ґрунту, $H = H_{П} + H_{ГЛ} + H_{ГР}$.

Із рис. 1 видно, що з урахуванням (6) тришаровий стовп ґрунту можна представити за аналогією до електричних кіл постійного струму, як ділянку із послідовним з'єднанням трьох опорів. Тиски відіграють роль потенціалів у відповідних точках, а витрата Q – роль струму через три послідовні опори. Тоді із (3)÷(5) можна отримати такі вирази для визначення опору кожного окремого шару ґрунту:

$$R_i = \frac{\dot{I}_i}{\tilde{N}_i} \cdot \frac{\mu}{F}, \quad R_{\bar{A}\bar{E}} = \frac{\dot{I}_{\bar{A}\bar{E}}}{\tilde{N}_{\bar{A}\bar{E}}} \cdot \frac{\mu}{F},$$

$$R_{\bar{A}\bar{D}} = \frac{\dot{I}_{\bar{A}\bar{D}}}{\tilde{N}_{\bar{A}\bar{D}}} \cdot \frac{\mu}{F}. \quad (8)$$

Оскільки зміна в'язкості газу по висоті стовпа ґрунту є незначною, то можна прийняти її постійною. Тоді за правилом знаходження загального опору послідовного з'єднання отримуємо наступну залежність:

$$\frac{\dot{I}}{\tilde{N}} = \frac{\dot{I}_i}{\tilde{N}_i} + \frac{\dot{I}_{\bar{A}\bar{E}}}{\tilde{N}_{\bar{A}\bar{E}}} + \frac{\dot{I}_{\bar{A}\bar{D}}}{\tilde{N}_{\bar{A}\bar{D}}},$$

$$\text{або} \quad \tilde{N} = \dot{I} \left/ \left(\frac{\dot{I}_i}{\tilde{N}_i} + \frac{\dot{I}_{\bar{A}\bar{E}}}{\tilde{N}_{\bar{A}\bar{E}}} + \frac{\dot{I}_{\bar{A}\bar{D}}}{\tilde{N}_{\bar{A}\bar{D}}} \right) \right. \quad (9)$$

Користуючись електричними аналогіями, із виразів (8) випливає, що відношення μ/C є питомим опором ґрунту, або навпаки C/μ – це питома провідність (проникність ґрунту).

Вираз (9) можна отримати також, не користуючись електричними аналогіями, а способом послідовного виключення тисків P_{01} , P_{02} із рівнянь (3)÷(5).

Математична модель витікання газу із підземного газопроводу побудована авторами на основі дросельної структури, зображеної на рис. 2. У дросельній моделі процесу витікання тришаровий стовп ґрунту над отвором у газопроводі розглядається як опір R_0 , тобто

$$R_0 = H\mu/(CF), \quad (10)$$

де C – коефіцієнт газопроникності стовпа ґрунту, отриманий за формулою (9).

Стовпи ґрунту, які прилягають до центрального стовпа (стовпа над отвором у газопроводі), так само розглядаються як опори R_0 . Горизонтальний шар ґрунту між двома сусідніми вертикальними дроселями R_0 розглядають як опір R_r (рис. 2 і рис. 3), який визначають за значенням коефіцієнта проникності того середовища, через яке протікає газ у горизонтальному напрямі. Зокрема, розглядаючи протікання газу вздовж газопроводу – за значенням коефіцієнта проникності піску:

$$R_{\bar{A}} = \frac{\Delta L}{\bar{N}_i} \cdot \frac{\mu}{F}. \quad (11)$$

Таким чином, вважаючи, що вертикальна структура ґрунту вздовж газопроводу є незмінною тришаровою, отримуємо структуру моделі, зображену на рис. 2.

Для того, щоб математично описати цю структуру, застосуємо метод, який відомий в електротехніці під назвою метод “контурних

струмів”. У даному випадку його можна назвати методом “контурних витрат”. За цим методом контурна витрата в кожному окремому контурі розглядається незалежно від витрат в інших контурах. Сумарні витрати у окремих ділянках контурів знаходимо сумуванням значень контурних витрат. Рівняння балансу потенціалів (тисків) у кожному контурі будується для “контурної” витрати з урахуванням витрат тиску, що відповідають витратам інших контурів на спільних ділянках вибраного контуру.

Наприклад, рівняння балансу тисків для першого контуру, який показаний на рис. 2, має такий вигляд:

$$Q_1 \cdot (R_0 + R_{\bar{A}}) + Q_2 \cdot R_{\bar{A}} + Q_3 \cdot R_{\bar{A}} + \dots + Q_{n-1} \cdot R_{\bar{A}} + Q_{n_1} \cdot R_{\bar{A}} = P - P_a \quad (12)$$

Описавши таким чином кожен із контурів, отримуємо наступну систему лінійних алгебраїчних рівнянь:

$$\begin{cases} Q_0 \cdot R_0 = P - P_a, \\ Q_1 \cdot (R_0 + R_{\bar{A}}) + Q_2 \cdot R_{\bar{A}} + Q_3 \cdot R_{\bar{A}} + \dots + Q_{n-1} \cdot R_{\bar{A}} + Q_{n_1} \cdot R_{\bar{A}} = P - P_a, \\ Q_1 \cdot R_{\bar{A}} + Q_2 \cdot (R_0 + 2R_{\bar{A}}) + Q_3 \cdot 2R_{\bar{A}} + \dots + Q_{n-1} \cdot 2R_{\bar{A}} + Q_{n_1} \cdot 2R_{\bar{A}} = P - P_a, \\ Q_1 \cdot R_{\bar{A}} + Q_2 \cdot 2R_{\bar{A}} + Q_3 \cdot (R_0 + 3R_{\bar{A}}) + \dots + Q_{n-1} \cdot 3R_{\bar{A}} + Q_{n_1} \cdot 3R_{\bar{A}} = P - P_a, \\ \vdots \\ Q_1 \cdot R_{\bar{A}} + Q_2 \cdot 2R_{\bar{A}} + \dots + Q_i \cdot (R_0 + iR_{\bar{A}}) + Q_{i+1} \cdot iR_{\bar{A}} + \dots + Q_{n-1} \cdot iR_{\bar{A}} + Q_{n_1} \cdot iR_{\bar{A}} = P - P_a, \\ \vdots \\ Q_1 \cdot R_{\bar{A}} + Q_2 \cdot 2R_{\bar{A}} + \dots + Q_{n-1} \cdot (n_1 - 1)R_{\bar{A}} + Q_{n_1} \cdot (R_0 + n_1 R_{\bar{A}}) = P - P_a. \end{cases} \quad (13)$$

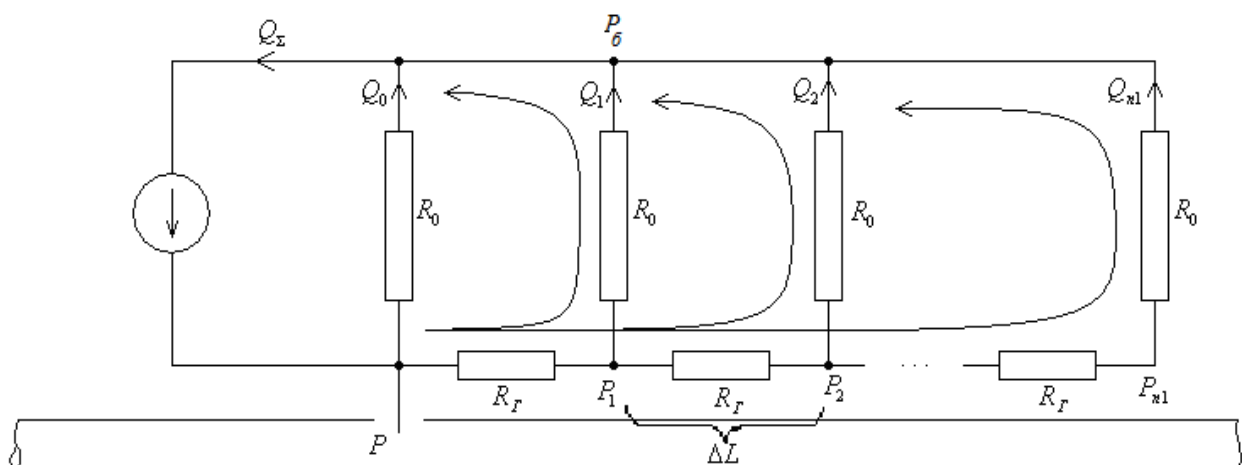


Рисунок 2 – Структурна схема моделі витіку газу вздовж газопроводу

Отримана система рівнянь (13) дозволяє визначити значення витрат газу через стовп ґрунту над газопроводом при віддалі від центру витоків з кроком ΔL . Необхідна кількість рівнянь визначається ітераційним шляхом у процесі розрахунку, виходячи із аналізу значень витрати та тиску на певній віддалі від центру витоків.

У випадку, якщо б структура ґрунту навколо центру витоків була однорідною по всьому радіусу витоків, можна було б визначити об'єм витоків на основі значень витрат Q_1, Q_2, \dots, Q_n , отриманих із (13), та значень кільцевих площ витоків, що відповідають розміщенню кожного дроселя відносно центра витоків. Однак вертикальна структура ґрунту є тришаровою (пісок – глина – гравій) вздовж траншеї і змінюється на одношарову (глина) при виході за межі траншеї. Тому модель витоків в площині, перпендикулярній до осі газопроводу, відрізняється від моделі (13) витоків в площині вздовж осі газопроводу.

Запропонована структура моделі витоків в площині, перпендикулярній до осі газопроводу, зображена на рис. 3.

Згідно із зображеною структурою контури витікання від 1-го по m -ий знаходяться в межах траншеї (штрихова лінія на рис. 3), контури витікання від m -ого по n_2 – поза межами траншеї. Відповідно опори R_0, R_{Γ} визначаються за формулами (9), (10). Опори $R_{01}, R_{\Gamma 1}$ визначаються проникністю глини. Тому

$$R_{01} = \frac{I}{\tilde{N}_{\bar{A}\bar{E}}} \cdot \frac{\mu}{F}, \quad R_{\bar{A}1} = \frac{\Delta L}{\tilde{N}_{\bar{A}\bar{E}}} \cdot \frac{\mu}{F}, \quad (14)$$

де H – загальна висота стовпа ґрунту; $C_{\Gamma 1}$ – коефіцієнт газопроникності стовпа глини.

Система рівнянь, яка побудована за методом контурних витрат для поперечної площини, має такий вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} Q_1 \cdot (R_0 + R_{\bar{A}}) + Q_2 \cdot R_{\bar{A}} + Q_3 \cdot R_{\bar{A}} + \dots + Q_{n_2-1} \cdot R_{\bar{A}} + Q_{n_2} \cdot R_{\bar{A}} = P - P_{\bar{a}}, \\ Q_1 \cdot R_{\bar{A}} + Q_2 \cdot (R_0 + 2R_{\bar{A}}) + Q_3 \cdot 2R_{\bar{A}} + \dots + Q_{n_2-1} \cdot 2R_{\bar{A}} + Q_{n_2} \cdot 2R_{\bar{A}} = P - P_{\bar{a}}, \\ \vdots \\ Q_1 \cdot R_{\bar{A}} + Q_2 \cdot 2R_{\bar{A}} + Q_3 \cdot 3R_{\bar{A}} + \dots + Q_m \cdot (R_0 + mR_{\bar{A}}) + Q_{m+1} \cdot mR_{\bar{A}} + \dots + Q_{n_2} \cdot mR_{\bar{A}} = P - P_{\bar{a}}, \\ Q_1 \cdot R_{\bar{A}} + Q_2 \cdot 2R_{\bar{A}} + \dots + Q_m \cdot mR_{\bar{A}} + Q_{m+1} \cdot (R_{01} + mR_{\bar{A}} + R_{\bar{A}1}) + Q_{m+2} \cdot (mR_{\bar{A}} + R_{\bar{A}1}) + \\ \dots + Q_{n_2} \cdot (mR_{\bar{A}} + R_{\bar{A}1}) = P - P_{\bar{a}}, \\ \vdots \\ Q_1 \cdot R_{\bar{A}} + Q_2 \cdot 2R_{\bar{A}} + \dots + Q_m \cdot mR_{\bar{A}} + Q_{m+1} \cdot (mR_{\bar{A}} + R_{\bar{A}1}) + Q_{m+2} \cdot (mR_{\bar{A}} + R_{\bar{A}1}) + \\ \dots + Q_{n_2-1} \cdot (mR_{\bar{A}} + (n_2-1-m) \cdot R_{\bar{A}1}) + Q_{n_2} \cdot (R_{01} + mR_{\bar{A}} + (n_2-m) \cdot R_{\bar{A}1}) = P - P_{\bar{a}}. \end{array} \right. \quad (15)$$

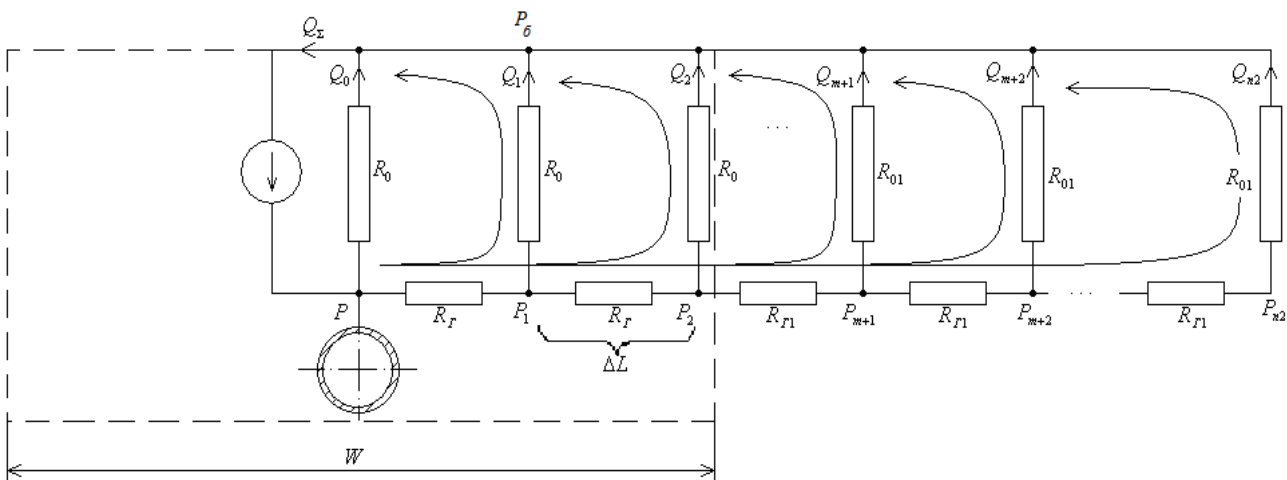


Рисунок 3 – Структурна схема моделі витоків газу в площині перпендикулярній осі газопроводу

Математична модель процесу витікання газу із підземного газопроводу, яка побудована на основі систем рівнянь (13) і (15), дозволяє визначити значення витрат Q_1, Q_2, \dots, Q_{n1} по всій площі витікання газу, враховуючи неоднорідність структури ґрунту. Модель дозволяє також визначити тиски P_1, P_2, \dots, P_n у вузлових точках вздовж газопроводу на його зовнішній поверхні (рис. 2 і рис. 3) та виконати приведення витрати у кожній точці до стандартних умов за відомою залежністю:

$$Q_{c,j} = \frac{P_j T_c}{P_c T} \frac{1}{K_j} Q_j, \quad (16)$$

де P_c, T_c – тиск і температура в стандартних умовах ($P_c = 101325$ Па, $T_c = 293,15$ К); P_j – значення тиску у j -ій вузловій точці i -ої поперечної площини; K_j – коефіцієнт стисливості газу обчислений для тиску P_j за методами [8]; Q_j – значення витрати в робочих умовах у j -ій вузловій точці i -ої поперечної площини.

Сумарна витрата витоку газу із підземного газопроводу знаходиться як сума витрат, приведених до стандартних умов по всій площі витікання.

Розроблена математична модель застосована авторами для визначення площі витоку та сумарного об'єму витоку газу із газопроводу низького тиску. Для виконання розрахунку прийнято вихідні дані, що отримані авторами за результатами обстеження реального випадку пошкодження ділянки газопроводу низького тиску:

1) абсолютний тиск газу у газопроводі, із якого витікає газ становить $P=(10000 \text{ мм.вод.ст.} + 150 \text{ мм.вод.ст.}) \cdot 9,80665 = 99537,5$ Па;

2) стовп ґрунту над газопроводом має

тришарову структуру: нижній шар – пісок, висота шару $H_{\text{п}}=0,1$ м; середній шар – глина, висота шару $H_{\text{гл}}=0,3$ м; верхній шар – щебінно-гравієва засипка, висота шару $H_{\text{гп}}=0,9$ м. Загальна висота стовпа ґрунту $H=1,3$ м;

3) середні значення коефіцієнта газопроникності отримані експериментальним шляхом [7] для зразків порід, відібраних над пошкодженим газопроводом: для піску – $\bar{C}_f = 2,0607 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2$; для глини – $\bar{C}_{\text{гг}} = 2,6470 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2$; для щебінно-гравієвої засипки – $\bar{C}_{\text{гб}} = 1,1567 \times 10^{-10} \text{ м}^2$. Коефіцієнт газопроникності тришарового стовпа ґрунту, який визначений за формулою (9), $C = 1,0691 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2$;

4) сумарна площа отворів витоку газу на трубопроводах рівна $0,009321 \text{ м}^2$. Таке значення площі отримане як сума площ 48-ми корозійних пошкоджень, виявлених на ділянці сталюого підземного газопроводу довжиною 3 м.

На основі вихідних даних сформовано системи рівнянь (13) і (16) та розв'язано їх із застосуванням матричних операторів у програмному середовищі Matlab. Таким чином визначено, що приведена до стандартних умов із підземного газопроводу низького тиску сумарна витрата газу по всій площі витоку дорівнює $12,46 \text{ м}^3/\text{год}$, а аналізована площа витоку становить $76,806 \text{ м}^2$.

Оскільки системи рівнянь (13) та (15) дозволяють вибрати достатньо малий крок дискретизації по площі витікання ΔL , то похибка дискретизації є незначною, а, отже, похибка визначення сумарної витрати газу Q_c визначається похибками аргументів рівняння (2). Похибки визначення складових рівняння (2) для представленого вище реального випадку пошкодження ділянки газопроводу низького тиску наведені у табл. 1.

Таблиця 1 – Похибки визначення аргументів рівняння (1)

№ з/п	Назва параметру	Значення максимальної відносної похибки, %	Спосіб визначення похибки
1	Коефіцієнт газопроникності стовпа ґрунту	3,7	Обчислено на основі похибок експериментальних значень $C_{\text{п}}, C_{\text{гл}}, C_{\text{гп}}$ із [7]
2	Сумарна площа пошкоджень газопроводу	5,0	За результатами вимірювань геометричних характеристик пошкоджень
3	Тиск у газопроводі	5,0	За паспортною характеристикою регулятора тиску ГРП
4	Вязкість природного газу	6,7	За даними [8]
5	Висота стовпа ґрунту	0,5	За результатами вимірювання

Так як визначення об'єму витоку виконується для певного періоду часу, на протязі якого тиск газу може змінюватись в межах похибки його регулювання, то наведене у табл. 1 значення похибки визначення тиску газу отримане як паспортне значення похибки регулятора тиску.

Приймаючи до уваги, що параметри, перераховані у табл. 1, є некорельованими, а похибки їх визначення є випадковими, загальну граничну похибку розрахунку сумарної витрати газу Q_c визначено шляхом геометричного сумування складових згідно даних табл. 1. Загальна гранична похибка розрахунку сумарної витрати газу Q_c , визначена за значеннями складових похибок, наведених у табл. 1, дорівнює 10,4 %.

ВИСНОВКИ

Розроблена математична модель процесу витікання газу із підземного газопроводу, яка враховує неоднорідність структури ґрунту по висоті стовпа ґрунту над газопроводом та по площі витікання і дозволяє визначити значення витрати газу у кожній точці площі витікання, значення тисків у вузлових точках вздовж газопроводу на його зовнішній поверхні та сумарну витрату витоку газу із підземного газопроводу, приведену до стандартних умов.

Розроблена математична модель може служити основою для розробки методики визначення об'єму газу, втраченого через пошкодження підземних газопроводів у газорозподільних мережах.

1. *Правила обстежень, оцінки технічного стану, паспортизації та проведення планово-запобіжних ремонтів газопроводів і споруд на них. Затверджені наказом Державного комітету будівництва України № 124 від 09.06.1998 р. та зареєстровані в Міністерстві юстиції України 13.11.1998 р. за № 723/3163.*

2. *Виявлення витоків (втрат) природного газу в газорозподільній мережі з використанням мобільного витратовимірювального комплексу: СОУ 40.2-20077720-040:2011 – Київ, НАК “Нафтогаз України”, 2011.* 3. *Методика визначення питомих виробничо-технологічних втрат природного газу під час його транспортування газорозподільними мережами. – Затв. Наказом мін. палива та енергетики №264 від 30.05.2003. Із змінами та доповненнями, внесеними наказами Мін. палива та енергетики від 01.11.2006 №418 та від 20.11.2007 №558.* 4. *Методика визначення питомих виробничо-технологічних витрат природного газу під час його транспортування газорозподільними мережами. – Затв. Наказом мін. палива та енергетики №264 від 30.05.2003. Із змінами та доповненнями, внесеними наказами Мін. палива та енергетики від 01.11.2006 №418 та від 20.11.2007 №558.* 5. *Гладкий А.В. Основи математичного моделювання в екології: Навч. посібн. / Гладкий А.В., Сергієнко І.В., Скопечкий В.В. – К.: В-во інституту кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України, 2008. – 250 с.* 6. *Мала гірнича енциклопедія: в 3-х т.; за ред. В. С. Білецького. – Донецьк: “Донбас”, 2004.* 7. *Матіко Ф.Д. Визначення газопроникності ґрунтів для розрахунку втрат газу внаслідок пошкоджень підземних газопроводів / Ф.Д. Матіко, Г.Ф. Матіко, А.В. Федоришин // Науковий вісник НЛТУ України. – 2009. – Вип.19.13 – С.50-55.* 8. *Газ природный. Методы расчета физических свойств. Определение коэффициента сжимаемости : ГОСТ 30319.2-96. - М.: Изд-во стандартов, 1997. – 53 с.*

Поступила в редакцію 18.04.2012 р.

Рекомендував до друку докт. техн. наук, проф. Пістун Є. П.