

ВПЛИВ ФІЛЬТРАЦІЙНОГО ОПОРУ ҐРУНТУ НА ІНТЕНСИВНІСТЬ АВАРІЙНИХ ВИТОКІВ ІЗ ГАЗОПРОВОДУ

В.Я. Грудз, Я.В. Грудз, Н.Я. Дрінь, Я.М. Дем'янчук

ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 42342,
e-mail: public@nupg.edu.ua

Розглядається процес нестационарної фільтрації газу в ґрунті, викликаний появою аварійного витoku з газопроводу. Пропонується розрахувати першу і другу стадії нестационарної фільтрації у процесі формування ареалу загазованості. На основі математичних моделей отримано розрахункові залежності для прогнозування процесу формування поля розподілу тисків в пористому середовищі для кожної з фаз нестационарної фільтрації. Встановлено характер зміни величини масової витрати витoku в часі у ході нестационарної фільтрації, показано, як впливають властивості ґрунту (зокрема його проникність) на тривалість нестационарного процесу і величину витрати витoku. Після зіставлення аналітичних результатів з реальними внесено поправки до відомої формули Сен-Венана-Венцеля з межею її адаптації.

Ключові слова: аварійний виток газу, фільтрація, ареал загазованості, критичний і до критичний режими витікання.

Рассматривается процесс нестационарной фильтрации газа в почве, вызванный появлением аварийной утечки из газопровода. Предлагается произвести расчет первой и второй стадий нестационарной фильтрации в процессе формирования ареала загазованности. На основе математических моделей получены расчетные зависимости для прогнозирования процесса формирования поля распределения давлений в пористой среде для каждой из фаз нестационарной фильтрации. Установлен характер изменения величины массового расхода утечки во времени при нестационарной фильтрации, указано влияние свойств почвы (в частности ее проницаемости) на продолжительность нестационарного процесса и величину расхода утечки. После сопоставления аналитических результатов с реальными внесены поправки в известную формулу Сен-Венана-Венцеля с пределом ее адаптации.

Ключевые слова: аварийная утечка газа, фильтрация, ареал загазованности, критический и докритический режимы истечения.

The article deals with the process of non-stationary gas filtration in the soil caused by emergence of pipeline emergency leak. It is suggested to calculate the first and second stages of non-stationary filtration in the process of gas pollution area formation. Calculation dependencies to forecast the pressure distribution field formation in a porous medium for each phase of non-stationary filtration were obtained on the basis of the mathematical models. The nature of the leak mass-flow rate change during the process of non-stationary filtration is determined and the way the soil properties (including its permeability) influence the duration of the non-stationary process and leak flow rate is shown. Some corrections for the well-known Saint-Venant-Wenzel formula with the limit of its adaptation were made on the basis of comparison of analytical results with the real ones.

Key words: emergency gas leak, filtration, gas pollution area, critical and subcritical leak modes.

Вступ. Лінійна частина магістральних газопроводів більш як на 90% знаходиться в підземному середовищі, тобто оточена ґрунтом. Саме та частина лінійних ділянок є найбільш сприятливим об'єктом для протікання корозійних процесів, викликаних пошкодженням ізоляційного покриття і дією агресивного середовища, що створює умови появи корозійних пошкоджень, які супроводжуються витокami газу з газопроводу.

Виток газу на підземній частині ділянки газопроводу надзвичайно небезпечний, оскільки окрім втрат цінного енергоносія призводить до утворення зони загазованості ґрунту і повітряного басейну, що викликає вибухонебезпечну ситуацію.

Очевидно, що фізичні властивості, зокрема фільтраційний опір, ґрунту як корисного середовища повинні мати вплив на інтенсивність витікання газу з газопроводу і формування ареалу загазованості. Тому існує взаємозв'язок між процесом витікання газу з газопроводу через аварійний отвір і його фільтрацією в навколишньому ґрунті.

Аналіз сучасних закордонних та вітчизняних досліджень. Дана стаття 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.». Процес витікання газу з ємності, де він знаходиться під надлишковим тиском, через отвір досліджувався роботами ряду вчених, серед яких слід зауважити, в першу чергу, Чарного І.А. [1], в яких запропоновано аналітичну основу математичного моделювання процесу, що базується на рівнянні енергії. До класичних досліджень слід також віднести праці Ландау Л.Д. [2], Лойцяньського Л.Г. [3], Яковлева Е.И. [4], Абрамовича Г.Н. [5], Campbell J.L. [6], Kantola R. [7].

Висвітлення невирішених раніше частин загальної проблеми. У працях наведено результати досліджень термогазодинаміки проце-

су витікання, дано аналіз чинників, що мають вплив на протікання процесу, визначено границі критичного та докритичного витікання, запропоновано розрахункові формули та методику. Однак, реальний вплив параметрів процесу на витрату газу виявляється складнішим порівняно з прогнозованим теоретично. Тому фактична витрата витікання газу суттєво відрізняється від розрахункової, що спотворює прогнозовані розрахунки.

Цілі статті. Розглядаємо процес нестационарної фільтрації газу в ґрунті, викликаний появою аварійного витіку з газопроводу. Запропоновано розрахувати першу і другу стадію нестационарної фільтрації в процесі формування ареалу загазованості. Отримано на основі математичних моделей розрахункові залежності для прогнозування формування поля розподілу тисків в пористому середовищі для кожної з фаз нестационарної фільтрації.

Основний матеріал. В результаті аналітичних досліджень, в основу яких покладено рівняння енергії газового потоку, отримано залежність, що зв'язує масову витрату з параметрами процесу витікання, яка відома під назвою формули Сен-Венана-Вентцеля

$$G = \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{2k}{k-1} P_0 \rho_0 \left[\left(\frac{P_1}{P_0} \right)^{\frac{k-1}{k}} - \left(\frac{P_1}{P_0} \right)^{\frac{2}{k}} \right]}, \quad (1)$$

де k - показник адиабати процесу;
 P_0, P_1 - тиски в середині ємності та зовні;
 ρ_0 - густина газу при умовах всередині ємності,
 d - діаметр отвору.

Запропонована формула є класичною залежністю, яку використовують для визначення інтенсивності витікання газу.

Аналіз характеру залежності витрати m від відношення тиску газу на виході з сопла до тиску перед соплом $p_1 / p_0 = \psi$, що дається рівнянням (1), свідчить, що ця залежність має вигляд параболи (рис. 1).

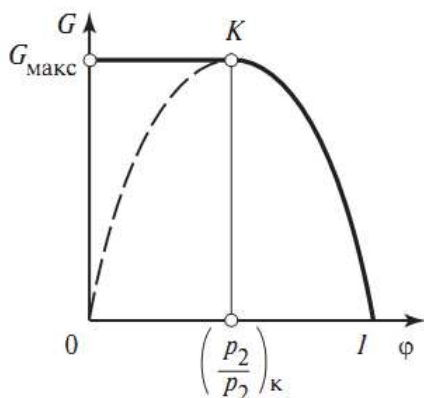


Рисунок 1 – Залежність масової витрати витікання від перепаду тисків

Очевидно, що $G=0$ при $\psi=1$. При подальшому зменшенні ψ значення G починає зростати, досягаючи максимуму при деякому ψ . При подальшому зменшенні ψ значення G відповідно до рівняння (1) зменшується, перетворюючись на нуль при $\psi=0$. Порівняння описаної залежності $G=f(\psi)$ з експериментальними даними щодо витікання газів з сопел виявило цікаву картину. У інтервалі значень ψ від одиниці до значення, що відповідає максимальній витраті, результати розрахунку рівняння (1) добре співпадають з експериментальними даними. Що ж до області значень ψ між значенням, що відповідає максимальній витраті, і нулем, то виявлено дивовижний результат - зменшення тиску середовища за отвором ніяк не впливало на витрату газу; витрата G залишалася постійною для усього цього інтервалу змін ψ . Для того, щоб пояснити цю розбіжність теорії з експериментом А Сен-Венаном висунуто гіпотезу про те, що при розширенні газу, неможливо отримати тиск газу нижче деякого критичного значення витікання p^* , газу, що відповідає максимальній витраті. Отже, при скільки завгодно низьких тисках середовища за отвором, менших p^* , тиск газу у вихідному перерізі залишається постійним і рівним p^* . Тому зроблене раніше твердження про те, що швидкість газу на виході з сопла w росте зі зменшенням ψ , потребує істотного уточнення: це зростання має місце лише до тих пір, поки p_1 не зменшиться до p^* . Подальше зниження тиску за отвором не призводить до зростання w . Таким чином, процес витікання газу через отвір ділиться на дві фази: докритичне і критичне витікання.

Відомі також результати досліджень [8], якими доведено на основі проведених експериментів, що формула Сен-Венана-Вентцеля дає результати в порівнянні з фактичними даними з відхиленням в більшу сторону, і це відхилення характерне як для докритичного, так і для критичного витікання. Отримано поправки, для адаптації залежності (1) до реальних умов, що є функціями параметрів процесу витікання і фізичних властивостей газу. Однак, дослідження проведені для умов витікання газу в атмосферу, тобто за умови $P_1 = P_a$ (P_a - атмосферний тиск), тому для умов підземного газопроводу вони не придатні, оскільки не враховують фільтраційного опору ґрунту.

Обробка результатів експериментальних досліджень методами теорії раціонального планування експерименту [10] дозволено отримати емпіричні залежності для адаптивних поправок до формули Сен-Венана-Вентцеля:

- для критичного витікання газу

$$\mu = 0.285 \cdot d^{0.45} R^{0.033} T^{0.034} \exp(-0.0015P^2); \quad (2)$$

- для докритичного витікання газу

$$\mu = 0.582 \cdot (RT)^{0.025} p^{-0.11}, \quad (3)$$

де μ - коефіцієнт витрати отвору;

d – діаметр отвору в мм;
 R – газова стала в Дж/кгК;
 T – абсолютна температура в ресивері в К;
 P – тиск газу в бар.

Таким чином залежність (1) адаптується до реальних умов витікання газу в атмосферу. Для підземних газопроводів необхідно врахувати гідравлічний опір ґрунту на основі дослідження процесів фільтрації газу.

В ряді досліджень [9, 10] розглядається процес фільтрації газу в ґрунті внаслідок появи аварійного витоку з газопроводу.

Загальний процес формування ареалу загазованості пропонується розділити на дві нестационарні фази. Перша фаза починається з моменту виникнення витоку і закінчується досягнення 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.

На основі створених математичних моделей побудовано поле швидкостей фільтрації газу в процесі формування ареалу загазованості для першої і другої фаз нестационарної фільтрації. При цьому вважається, що масова витрата газу через корозійний отвір вважається сталою в часі.

Математичну модель плоскої нестационарної фільтрації газу в ґрунті побудовано на основі рівняння лінійної фільтрації у формі Дарсі та рівняння нерозривності [2,3]. Для одновимірного руху газу маємо:

$$w = \frac{k}{\eta} \frac{\partial P}{\partial x}, \quad -\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial(\rho w)}{\partial x}. \quad (4)$$

Переходом від одновимірної моделі до плоскої після складних перетворень отримаємо математичну модель для швидкості фільтрації рівняння плоскої задачі у наступному вигляді

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = \frac{kc^2 \rho}{\eta} \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \right) - \frac{kc^2 \rho q}{\eta F} \delta(x - x_g) \delta(y - y_g), \quad (5)$$

де ω - швидкість фільтрації як функція часу t і просторових декартових координат x, y ;

x_g, y_g - координати точкового джерела інтенсивністю q ;

$\delta(x - x_g), \delta(y - y_g)$ - функції Дірака;

F - площа перетину фільтрації.

Позначимо

$$\alpha = \frac{kc^2 \rho}{\eta},$$

c - швидкість розповсюдження звуку в середовищі;

ρ - густина газу.

Тоді на основі (5) отримаємо диференційне рівняння плоскої фільтрації газу в пористому середовищі у вигляді

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \right) - \alpha \frac{q}{F} \delta(x - x_g) \delta(y - y_g). \quad (6)$$

Аналогічно для розподілу тисків в пористому середовищі математична модель матиме вигляд

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial P}{\partial t} - q \frac{c^2}{\alpha} \delta(y - H) \delta(x - l) - q \xi \sigma(y - H) \delta(x - l), \quad (7)$$

де H - глибина розміщення витоку від поверхні;

l - віддаль до джерела по горизонталі від початку координат,

V - кінематична в'язкість газу.

Для першої фази нестационарної фільтрації визначилась швидкість фільтрації як функція плоских координат і газу.

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

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

де h - глибина закладення газопроводу в ґрунті.

Поставлена задача розв'язувалась із застосуванням інтегральних перетворень.

Використовуючи обернене синус-перетворення Фур'є, одержимо розв'язок поставленої задачі у вигляді

$$\begin{aligned} \omega(x, y, t) = & \frac{q}{2\pi F} \int_0^\infty \frac{\sin \lambda y_g \sin \lambda y}{\lambda} \times \\ & \times \left\{ \left[\sigma(x - x_g) - 1 \right] \left[e^{-\lambda(x_g - x)} \operatorname{erfc} \left(\frac{x_g - x}{2\sqrt{\alpha t}} - \lambda\sqrt{\alpha t} \right) - \right. \right. \\ & \left. \left. - e^{-\lambda(x_g - x)} \operatorname{erfc} \left(\frac{x_g - x}{2\sqrt{\alpha t}} + \lambda\sqrt{\alpha t} \right) \right] - \right. \\ & \left. - \sigma(x - x_g) \left[e^{-\lambda(x - x_g)} \operatorname{erfc} \left(\frac{x - x_g}{2\sqrt{\alpha t}} - \lambda\sqrt{\alpha t} \right) - \right. \right. \\ & \left. \left. - e^{-\lambda(x - x_g)} \operatorname{erfc} \left(\frac{x - x_g}{2\sqrt{\alpha t}} + \lambda\sqrt{\alpha t} \right) \right] \right\} d\lambda, \quad (8) \end{aligned}$$

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

$$\sigma = \begin{cases} 1, & \text{якщо } x > x_g \\ 0, & \text{якщо } x \leq x_g \end{cases}.$$

Використавши перше рівняння системи (4) (рівняння Дарсі) на основі (8) отримаємо залежність для розподілу тиску в ґрунті від поверх-

ні ($y = 0$), де тиск вважається атмосферним до витоку з трубопроводу ($y = H$)

$$P(x, y, t) = P_a + \frac{\eta}{k} \int_0^H w(x, y, t) dt. \quad (9)$$

Після інтегрування отримаємо значення тиску $P(0, H, t)$ в точці витікання газу в ґрунт як функцію часу.

Для другої фази нестационарного процесу формування ареалу забруднень витоками з газопроводу розглядається плоска задача фільтрації газу в пористому середовищі при виникненні точкового джерела, яким являється витік газу з газопроводу.

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 $P(x, 0, t) = P_a$, $P(\infty, y, t) = P_a$.

Тоді поставлена задача розв'язується за наступних початкових і граничних умов

$$w(x, 0, t) = 0; w(x, y, 0) = 0,$$

$$t = 0 \rightarrow P(x, 0, t) = P_a, P(x, y, t) = P_a,$$

$$t > 0 \rightarrow P(x, U_0, t) = P_a, P(\infty, Y, t) = P_a.$$

Математична модель реалізується методом інтегральних перетворень.

Розв'язок поставленої задачі розподілу тиску в поровому середовищі має вигляд

$$P(x, y, t) = P_a + \frac{q}{2\pi} \int_0^\infty \frac{\sin \lambda y_0 \sin \lambda y}{\lambda} \times \left\{ \left[\sigma(x - x_0) - 1 \right] \left[e^{-\lambda(x_0 - x)} \operatorname{erfc} \left(\frac{x_0 - x}{2\sqrt{\lambda t}} - \lambda\sqrt{\lambda t} \right) - e^{\lambda(x_0 - x)} \operatorname{erfc} \left(\frac{x_0 - x}{2\sqrt{\lambda t}} + \lambda\sqrt{\lambda t} \right) \right] - \sigma(x - x_0) \times \left[e^{-\lambda(x - x_0)} \operatorname{erfc} \left(\frac{x - x_0}{2\sqrt{\lambda t}} - \lambda\sqrt{\lambda t} \right) - e^{\lambda(x - x_0)} \operatorname{erfc} \left(\frac{x - x_0}{2\sqrt{\lambda t}} + \lambda\sqrt{\lambda t} \right) \right] \right\} d\lambda. \quad (10)$$

Розв'язок (10) дає змогу знайти тиск в точці витоку $P(0, 0, t)$ як функцію часу другої фази нестационарної фільтрації. При цьому вважається, що величина q витоку газу є постійною в часі.

Однак, аналіз (1) свідчить, що навіть при сталому тиску в середині ємності і сталому діаметрі отвору масова витрата витоку газу не може бути сталою в часі за умов до критичного витікання, оскільки змінюється зовнішній тиск P_1 .

Встановити характер зміни масової витрати витоку впродовж першої і другої фази нестационарної фільтрації газу в пористому середовищі є неможливим в аналітичній формі, оскільки тиск і витрата витоку взаємопов'язані. Тому в даному випадку доцільно застосувати ітераційний метод, який полягає в періодичній зміні стаціонарних станів системи.

Алгоритм розрахунку полягає в наступному. Вважаються відомими геометричні характеристики системи, фізичні властивості газу, а також тиск і температура в газопроводі, які вважаються сталими в часі. В початковому наближенні тиск середовища за отвором вважається рівним атмосферному P_a .

Діапазон часу нестационарного витікання газу розбивається на дискретні проміжки часу Δt , всередині яких процес можна вважати квазістаціонарним. На початку першого часового інтервалу витрата витоку визначається із залежності (1) і вважається сталою. Це дає змогу використати для визначення швидкості фільтрації w і тисків в поровому середовищі (ґрунті) залежності (8), (9) і (10). За знайденою за (9) швидкістю фільтрації w і проміжками часу Δt визначається висота проникнення газу в ґрунт

$$y_i = w \cdot \Delta t.$$

Якщо $y_i < H$ (глибина залягання трубопроводу), то має місце перша фаза нестационарної фільтрації визначається з залежності (9). В іншому випадку має місце друга фаза нестационарної фільтрації газу в ґрунті і тиск визначається з (10). Знаючи тиск газу $P(0, 0, t)$ в довкіллі, уточнюємо величину витрати газу за (1). Ітераційний процес триває до досягнення необхідної точності δq у визначенні витрати і закінчується після виконання умови

$$|G^{(s)} - G^{(s-1)}| < \delta q. \quad (11)$$

Після досягнення виконання умови (11) ітераційний процес переходить до наступного дискретного проміжку часу Δt . Вся процедура закінчується після досягнення стаціонарності процесу витікання, тобто до моменту часу, після якого тиск $P(0, 0, \Delta t)$ і масова витрата витоку $G_i^{(s)}$ перестають залежати від часу. В результаті отримують залежності зміни масової витрати і тиску газу в пористому середовищі за аварійним отвором як функції часу протягом першої і другої фази нестационарної фільтрації.

На рисунку 1 відображено результати прогнозування характеру зміни масової витрати витоку і тиску газу в перерізі за отвором для процесу нестационарної фільтрації газу викликають аварійним витоком з газопроводу для гіпотетичних умов. В умовах числового експерименту проникливість ґрунту було прийнято $0,08 \text{ дарсі}$ і $0,04 \text{ дарсі}$.

Наукова та практична цінність отриманих результатів. Аналіз результатів дослідження свідчить, що за рахунок припущень в формулі Сен-Венана-Вентцеля отримані

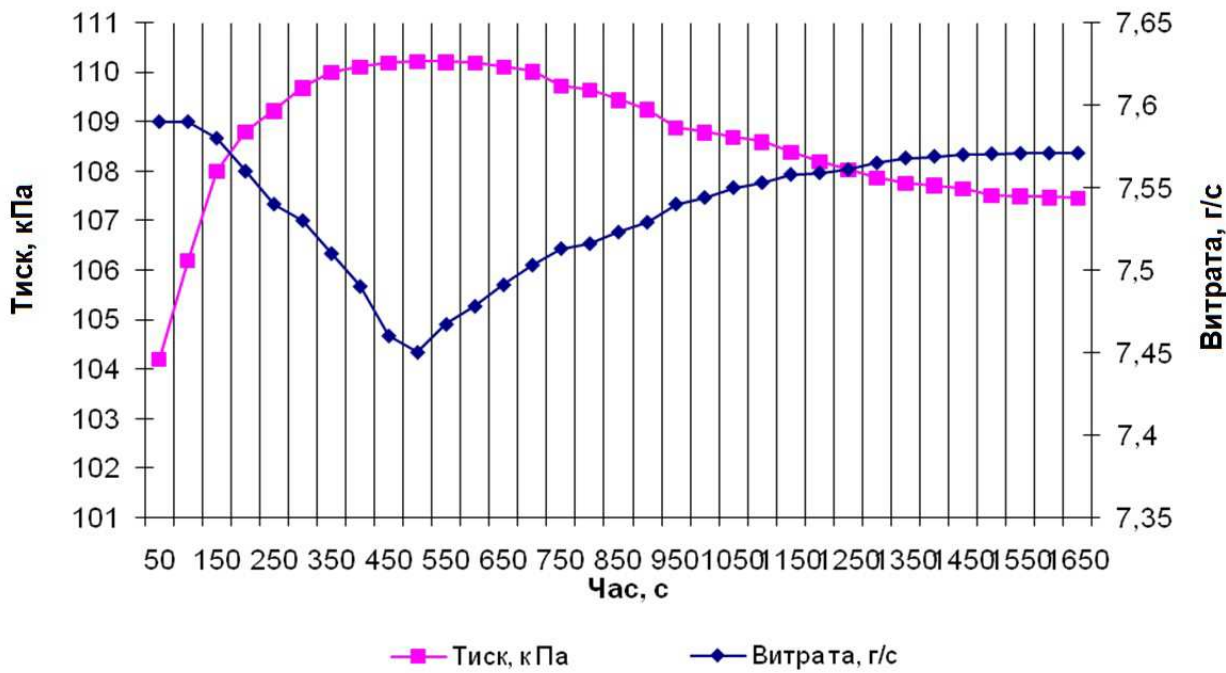


Рисунок 2 – Динаміка зміни тиску і витрати витікання газу в часі

результати суттєво вищі за реальні, тому для адаптації розрахункових залежностей необхідно вносити корегуючі поправки в відому залежність. Показано, що фільтраційний опір ґрунту при появі витоків з газопроводу створює додатковий протитиск, який суттєво впливає на величину витрати витікання і змінюється в часі. Тривалість нестационарного процесу фільтрації лежить в межах 1500-1800 с і з збільшенням проникності ґрунту зменшується. Пропонується розбити нестационарний процес на дві фази, перша з них починається з моменту появи витікання і триває до моменту досягнення газом поверхні землі, а друга починається з моменту досягнення газом поверхні землі і зменшується стаціонарним процесом витікання газу в атмосферу через ґрунт. Відповідно тривалість першої фази нестационарної фільтрації газу складає близько 500 с, і при зменшенні проникності в 4 рази зростає приблизно в 1,3 рази. Масова витрата витікання в умовах докритичного режиму впродовж першої фази знижується за рахунок зростання тиску в пористому середовищі, викликаного фільтрацією газу. В подальшому тиск стабілізується на кінець другої фази нестационарної фільтрації, що призводить до стабілізації витрати витікання.

Використання отриманих результатів і корегуючі поправки на практиці дозволить суттєво змінити підхід до питання витрат газу при транспортуванні і розподілі та ввести корективи в керівні документи з прогнозування витрат газу.

Висновки

Таким чином, в результаті проведених досліджень встановлено, що за рахунок припущень в формулі Сен-Венана-Вентцеля отримані результати суттєво вищі за реальні, для адекватності

прогнозованих показників запропоновано використовувати поправки в залежності від характеру витікання, які є функціями параметрів процесу і фізичних властивостей газу і для яких запропоновано емпіричні формули.

При витіканні газу в пористе середовище (ґрунт) необхідно враховувати в розрахунках процесу фільтраційний опір ґрунту, який залежить від його проникності. Із зменшенням проникності ґрунту швидкості фільтрації газу спадають, а тиск в пористому середовищі (зокрема за джерелом витікання) зростає в часі.

Процес нестационарної фільтрації газу в ґрунті, викликаний появою аварійного витікання з газопроводу, характеризується тривалістю 1500-1800 с (25-30 хв), яка при зменшенні проникності ґрунту зростає, пропонується розбити на дві фази, перша з них починається з моменту появи витікання і триває до моменту досягнення газом поверхні землі і за тривалістю складає близько третини всього нестационарного процесу, а друга починається з моменту досягнення газом поверхні землі і зменшується стаціонарним процесом витікання газу в атмосферу через ґрунт.

В період першої фази нестационарної фільтрації витрата витікання газу за умов до критичного витікання поступово зменшується і досягає мінімуму в кінцевий момент першої фази, а в подальшому починає зростати. Такий характер зміни витрати витікання пояснюється формуванням поля тисків в пористому середовищі. Запропоновані математичні моделі дають змогу прогнозувати процес формування ареалу загазованості і, відповідно, зміни витрати витікання газу впродовж протікання першої і другої фаз нестационарної фільтрації газу.

Література

- 1 Чарный И. А. Неустановившееся движение реальной жидкости в трубах. – М.: Недра, 1975. – С.198-201.
- 2 Ландау Л.Д. Теоретическая физика: В 10-ти т. Т.VI. Гидродинамика. – М.: Наука, 1988. – С. 67-75.
- 3 Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. 3 изд. – М., 1970. – С. 56-61.
- 4 Крылов Г. В. Эксплуатация газопровода в Западной Сибири / Г. В. Крылов, А. В. Матвеев, О. А. Степанов, Е. И. Яковлев. – Л.: Недра, 1985. – С. 274-278.
- 5 Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. – М.: Наука, 1976. – С. 156-157.
- 6 Campbell J.L., Yang T. Pulsatile flow behaviour in elastic system containing wave reflection. – Trans. ASME. Ser.D, 1969, vol. 91, No 1.
- 7 Kantola R. Transient response of fluid lines including frequency modulated inputs. – Trans. ASME. Ser. D, 1971, vol. 93, No 2.
- 8 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 // Нафтова і газова промисловість. –2011. – № 1. – С. 51-53.
- 9 Грудз В.Я. Дослідження процесу фільтрації газу в ґрунті при появі витоків з газопроводу / В.Я. Грудз, Я.В.Грудз, В.В.Фейчук, Н.Я.Дрінь, Р.Б.Стасюк // Нафтогазова енергетика. –2012. – № 3. – С. 65-68.
- 10 Протодьяконов Н.М. Методика рационального планирования эксперимента / Н.М. Протодьяконов, Р.Н. Тедер. – М.: Наука, 1970. – 76 с.

Стаття надійшла до редакційної колегії

03.06.15

Рекомендована до друку
професором **Середюк М.Д.**

(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)

д-ром техн. наук **Банахевичем Ю.В.**
(відділ МГ і ГРС ПАТ «Укртрансгаз»,
м. Київ)