

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ХАРАКТЕРИСТИК ҐРУНТУ НА ІНТЕНСИВНІСТЬ ВИТОКІВ ІЗ ГАЗОПРОВОДІВ

Н. Я. Дрінь*, О. В. Іванов

ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15; тел./ факс (03422) 42342,
e-mail: natalia.drin@nung.edu.ua, oleksandr.ivanov@nung.edu.ua

Витік газу з підземної частини ділянки газопроводу передбачає його подальшу фільтрацію в пористому середовищі (грунті) аж до виходу на поверхню, яка супроводжується постійним зростанням фільтраційного опору середовища. Тому зміна параметрів потоку газу в часі передбачає нестационарний процес, характеристики якого залежать від фільтраційних властивостей ґрунту, зокрема від його проникності. Очевидно, що фізичні властивості, зокрема фільтраційний опір ґрунту як пористого середовища, повинні мати вплив на інтенсивність витікання газу з газопроводу і формування ареалу загазованості. Тому існує взаємозв'язок між процесом витікання газу з газопроводу крізь аварійний отвір і його фільтрацією в навколишньому ґрунті. Встановлено характер зміни величини масової витрати витоку в часі впродовж процесу нестационарної фільтрації та показано, як впливають властивості ґрунту (зокрема його проникність) на тривалість нестационарного процесу і величину витрати витоку. Значні терміни експлуатації газопроводів викликають старіння металу внаслідок корозійних процесів та спричиняють аварії, що також стає причиною появи витоків із трубопроводів. Така ситуація є неприпустимою, з економічної та екологічної точки зору, оскільки витік газу може призвести до загазованості значної території, а в деяких випадках – до утворення газоповітряної суміші й вибуху, що пов'язано зі значними економічними збитками та створює небезпеку для людського життя. Встановлено, що при корозійних пошкодженнях трубопроводів найбільш ймовірні малі витіки, а при аваріях, зумовлених впливом зовнішніх сил, найвірогідніші великі витіки. Загальновідомо, що поява витоку газу з газопроводу викликає нестационарний процес, за характером протікання якого можна оцінити величину витоку. Якщо газопровід перед появою витоку працював у нестационарному режимі, то поява витоку внесе збурення в протікання нестационарного процесу.

Ключові слова: аварійний витік газу, корозійні процеси, фільтрація, ареал загазованості, матеріальний баланс.

The appearance of a gas leak in the underground part of the gas pipeline section implies its further filtration in a porous medium (soil) until it reaches the surface, which is accompanied by a constant increase in the filtration resistance of the medium. Therefore, changing the parameters of gas flow over time involves a non-stationary process, the characteristics of which depend on the filtration properties of the soil, in particular on its permeability. It is obvious that the physical properties, in particular the filtration resistance, of the soil as a porous medium should have an impact on the intensity of gas leakage from the pipeline and the formation of the area of gassiness. Therefore, there is a relationship between the process of gas leaking from the pipeline through the emergency hole and its filtration in the surrounding soil. The nature of the change in the value of mass flow leakage over time during the non-stationary filtration process is established, it is shown how soil properties (including its permeability) affect the duration of the non-stationary process and the value of leakage flow. Significant service life of gas pipelines causes aging of metal due to corrosion processes and accidents, which also leads to leaks from the pipelines. This situation is unacceptable from an economic and environmental point of view, as gas leaks can lead to gassing of large areas, and in some cases – to the formation of a gas mixture and explosion, resulting in significant economic damage and danger to human life. It is established that small leaks are the most probable in case of corrosion damage of pipelines, and large leaks are the most probable in case of accidents caused by external forces. It is well known that the occurrence of gas leakage from the pipeline causes a non-stationary process, the nature of which can be used to estimate the amount of leakage. If the gas pipeline operated in a non-stationary mode before the leak, the occurrence of a leak will disturb the non-stationary process.

Key words: emergency gas leak, corrosion processes, filtration, gas pollution area, material balance.

Вступ

Поставлена задача дослідження процесу формування ареалу загазованості ґрунту витоками газу з газопроводу вимагає проведення досліджень фільтраційних характеристик (зокрема проникності) ґрунтів навколишнього се-

редовища трубопроводу з урахуванням зовнішніх впливів (вологості, фракційного складу, внутрішнього тиску).

Характер витікання газу з газопроводу і формування ареалу загазованості в ґрунті є нестационарним процесом, який пропонується

розділити на дві фази, перша з яких починається з моменту появи аварійного витoku і закінчується досягненням потоку газу поверхні землі; друга фаза розпочинається одразу за першою і триває протягом стаціонарного витікання газу в атмосферу. В обидвох випадках параметри фільтрації газу в пористому середовищі і формування ареалу загазованості суттєво залежать від властивостей пористого середовища (грунту). Серед визначальних характеристик пористого середовища слід виділити проникність. Її величина й характер зміни в часі процесу формування ареалу загазованості мають вирішальне значення. Тому для побудови математичної моделі фільтрації газу в ґрунті і формування ареалу загазованості необхідно провести дослідження проникності ґрунтів і її залежності від зовнішніх впливів.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень і публікацій

Поставлені завдання розглядається різними авторами в процесі досліджень спорудження та ремонту трубопроводів [1-4]. В поданих роботах встановлено залежність між проникністю різних типів ґрунтів в непорушеному стані та їх фракційним складом. Хоча залежності фільтраційного опору ґрунтів від вологості та тиску в літературі відсутні, вони мають суттєвий вплив на процес формування ареалу загазованості ґрунту.

В роботах різних авторів [5-8] наведено результати досліджень фізичних властивостей ґрунтів (зокрема їх проникності і коефіцієнтів фільтраційного опору), визначено вказані параметри ґрунту для різних їх типів і природних умов. Однак, реальний вплив параметрів процесу на фільтрацію газу виявляється складнішим за прогнозований. Тому фактична витрата витікання газу суттєво відрізняється від розрахункової, що спотворює прогнозні розрахунки.

Відомі також результати досліджень [9, 10], якими доведено за результатами проведених експериментів, що формування ареалу загазованості має локальний вплив на незначній площі і тривалість нестационарних фаз процесу є невеликою. Проте апріорні показники свідчать про значно більшу тривалість процесів, що вимагає проведення додаткових досліджень і встановлення закономірностей впливу параметрів пористого середовища на характер формування ареалу загазованості з урахуванням зовнішніх впливів, до яких слід віднести, насамперед, вологість ґрунту і величину внутрішнього тиску.

Висвітлення невирішених раніше частин загальної проблеми

Розглядаючи малі витoki з газопроводів, ми обмежуємо область зміни зовнішніх впливів і характеру фільтрації газу в ґрунті. Робиться припущення, що фільтрація газу в ґрунті є лінійною і підпорядкована закону Дарсі. Інше припущення базується на принципі незалежності рухів і полягає в суперпозиції результатів фільтрації різних середовищ в ґрунті. Вважається також, що різні зовнішні впливи (вологість, внутрішній тиск) можуть змінюватися в часі і просторі.

Формулювання цілей статті

Метою проведення досліджень є встановлення характеристик пористого середовища (грунту), що мають вплив на характер формування ареалу загазованості витокami газу з газопроводу, і їх залежності від типів ґрунтів та зовнішніх впливів.

Вказана мета досягається шляхом реалізації наступних задач:

- дослідження залежності проникності різних типів ґрунтів від їх щільності та фракційного складу;
- дослідження впливу на проникність ґрунтів внутрішнього тиску;
- дослідження впливу на проникність ґрунтів їх вологості.

Вказані закономірності встановлюються шляхом проведення серій експериментів на дослідному стенді в лабораторних умовах.

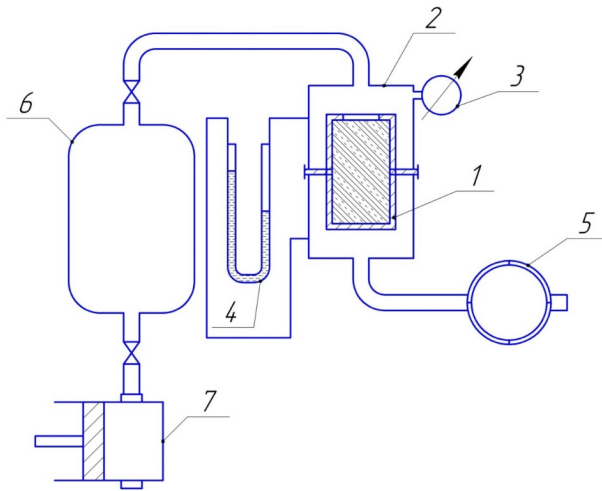
Дослідження проводились для пісків та супісків.

Висвітлення основного матеріалу дослідження

Для проведення експериментальних досліджень фізичних характеристик ґрунту і встановлення їх залежності від зовнішніх факторів був створений експериментальний стенд, схема якого наведена на рисунку 1.

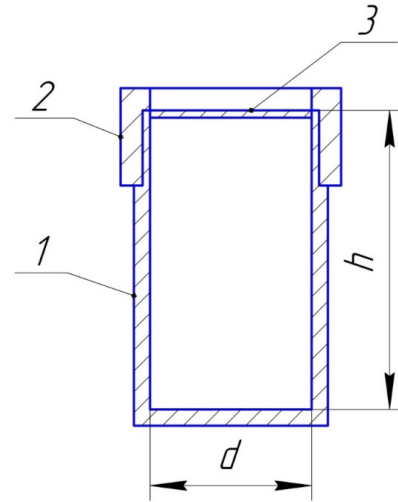
Технічна характеристика вимірювальних приладів подана в таблиці 1.

Контейнер перед проведенням дослідів заповнювався пробєю ґрунту заданої вологості і внутрішнього тиску та розміщався в барокамері експериментального стенду. За допомогою компресора 7 в ресивері 6 встановлювався заданий тиск повітря, яке подавалося в барокамеру 2 і проходило через контейнер з пробєю ґрунту 1 та через лічильник газу 5. Впродовж випробування контролювався робочий тиск в барокамері за допомогою манометра 3 та вимірювався перепад тиску U-подібним ртутним



1 – контейнер; 2 – барокамера; 3 – манометр;
4 – дифманометр; 5 – газовий лічильник;
6 – ресивер; 7 – компресор

Рисунок 1 – Схема вимірювального стенду



1 – корпус; 2 – накидна гайка; 3 – сітка

Рисунок 2 – Контейнер

Таблиця 1 – Характеристика вимірювальної техніки

№	Назва	Характеристика	Клас точності	Межі вимірювання
1	Манометр ОБМ1 – 100	Манометр стрілковий	1	$P_{\min} = 0.05 \div 0.1 \text{ атм}$ $P_{\max} = 4 \text{ атм}$
2	Лічильник газу G 4	Вимірює витрату газу в м^3 $V = 1.2 \text{ дм}^3$ $P_{\max} = 25 \text{ кПа}$	1	$Q_{\min} = 0.04 \text{ м}^3 / \text{год}$ $Q_{\max} = 6 \text{ м}^3 / \text{год}$
3	Дифманометр КХАП ГОСТ 9933-61	Дифманометр – U-подібна скляна трубка	1	Від 0 до 320 мм водяного стовпа

дифманометром 4. За допомогою лічильника 5 вимірювалась об'ємна кількість газу, що пройшла через контейнер за час, виміряний секундоміром.

Основним елементом дослідного стенду є контейнер з пробєю досліджуваного ґрунту, принципова схема якого зображена на рисунку 2.

Вологість ґрунту вимірювалась масовим методом. Перед проведенням дослідження проба ґрунту даного виду висушувалась до повного видалення вологи і вимірювався її об'єм V_{Γ} за допомогою мірного циліндра і маса M_{Γ} за допомогою аналітичної ваги. Тоді густина сухого ґрунту становила

$$\rho = \frac{M_{\Gamma}}{V_{\Gamma}} \quad (1)$$

В подальшому до проби ґрунту додавалась маса дистильованої води M_B , і суміш перемішувалась. Вологість проби ґрунту визначалась співвідношенням

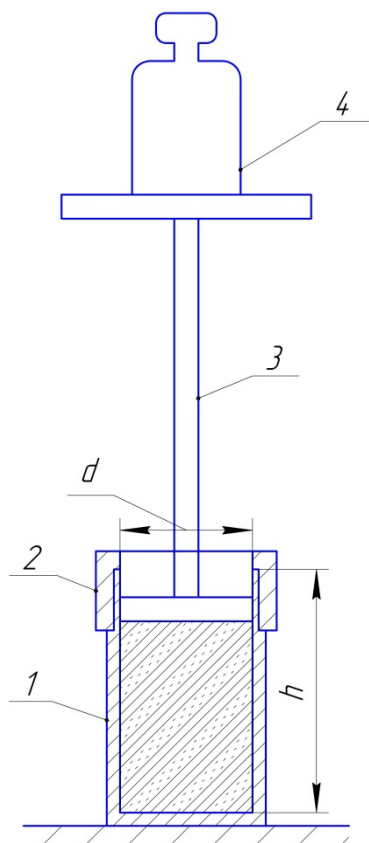
$$\phi = \frac{M_B}{M_{\Gamma} + M_B} \quad (2)$$

Напруження в ґрунті під дією зовнішніх сил будемо називати внутрішнім тиском, який визначається відношенням сили, що діє на пробу ґрунту, до відповідної площі. Перед проведенням кожного дослідження із відповідної серії величина внутрішнього тиску визначалась на стенді за схемою, наведеною на рисунку 3.

На корпус контейнера нагвинчується накидна гайка, внутрішній діаметр якої рівний внутрішньому діаметру корпусу контейнера. Система заповнюється досліджуваною пробєю ґрунту, на яку згори опускається поршень, з'єднаний через шток з вантажем масою m . Тоді внутрішній тиск у пористому середовищі розраховується за співвідношенням

$$\sigma = \frac{4mg}{\pi D^2} \quad (3)$$

Після встановлення рівноваги накидна гайка замінюється гайкою з сіткою, і контейнер встановлюється в барокамеру для визначення проникності проби ґрунту.



1 – контейнер; 2 – накидна гайка;
3 – шток з поршнем; 4 – вантаж

Рисунок 3 – Схема вимірювання тиску в ґрунті

Після встановлення контейнера з пробою ґрунту в барокамеру формується стаціонарний потік повітря з ресивера, впродовж якого вимірюється манометричний тиск в барокамері P_0 , перепад тиску у дифманометрі ΔP і витрата повітря, як відношення об'єму (за лічильником) V до часу (за секундоміром) t .

Швидкість фільтрації в пористому середовищі

$$w = \frac{P_c}{P_0} \frac{4Q}{\pi D^2} \quad (4)$$

Величина коефіцієнта фільтрації визначається з закону Дарсі

$$k = \frac{w\eta}{\Delta P / L}, \quad (5)$$

де η – динамічна в'язкість повітря;

L – висота контейнера.

В результаті проведених дослідів визначено величину проникності різних ґрунтів за різних умов.

Кінцевою метою проведених досліджень є встановлення закономірностей формування ареалу загазованості і його геометричних розмірів у пористому середовищі аварійними ви-

токамаи газу з газопроводу. Тому експериментальні дослідження проникності пористого середовища (ґрунту) проводились для одного з типів ґрунтів (піщаних).

Для кожного досліду в контейнері готувалася окрема проба ґрунту визначеного гранулометричного складу і густини, а також заданої вологості і внутрішнього тиску.

Слід зауважити, що експериментальним шляхом встановлено залежність проникності вологого ґрунту з певним внутрішнім тиском від часу витримування під навантаженням (рис. 4).

Виходячи з результатів експериментів, було прийнято рішення – при проведенні всіх дослідів витримувати пробу під навантаженням впродовж 24 години.

Для встановлення функціональної емпіричної залежності коефіцієнта проникності ґрунту від параметрів процесу фільтрації проводились серії дослідів на описаному вище дослідному стенді і здійснювалась їх обробка.

У серіях проведених експериментів оцінювався вплив гранулометричного складу піску h , його щільності (густини) ρ , вологості φ та внутрішнього тиску σ на величину коефіцієнта проникності ґрунту в умовах лінійного закону фільтрації.

Для забезпечення лінійного закону фільтрації повітря у пробі ґрунту, яка містилась в контейнері, обмежувалась витрата повітря Q через барокамеру. Критичне число Рейнольдса

$$Re_{кр} = \frac{w_{кр} d_0 \rho}{m\eta}, \quad (6)$$

де $w_{кр}$ - критична швидкість повітря при переході до нелінійного закону фільтрації;

d_0 - гранулометрична характеристика (діаметр твердої фракції);

η - динамічна в'язкість повітря;

m - пористість зрізку ґрунту.

Для визначення пористості сухого ґрунту даного гранулометричного складу його об'єм $V_{г}$ поміщався в герметичний контейнер, після чого туди закачувалося повітря до досягнення тиску P_1 . Після цього повітря з контейнера стравлювалося через лічильник в атмосферу до встановлення в контейнері тиску P_2 . При цьому покази лічильника склали $\Delta V_{г}$. Тоді коефіцієнт пористості зрізку ґрунту визначався як відношення об'єму пустот W_g до загального об'єму зрізку, який відомий W

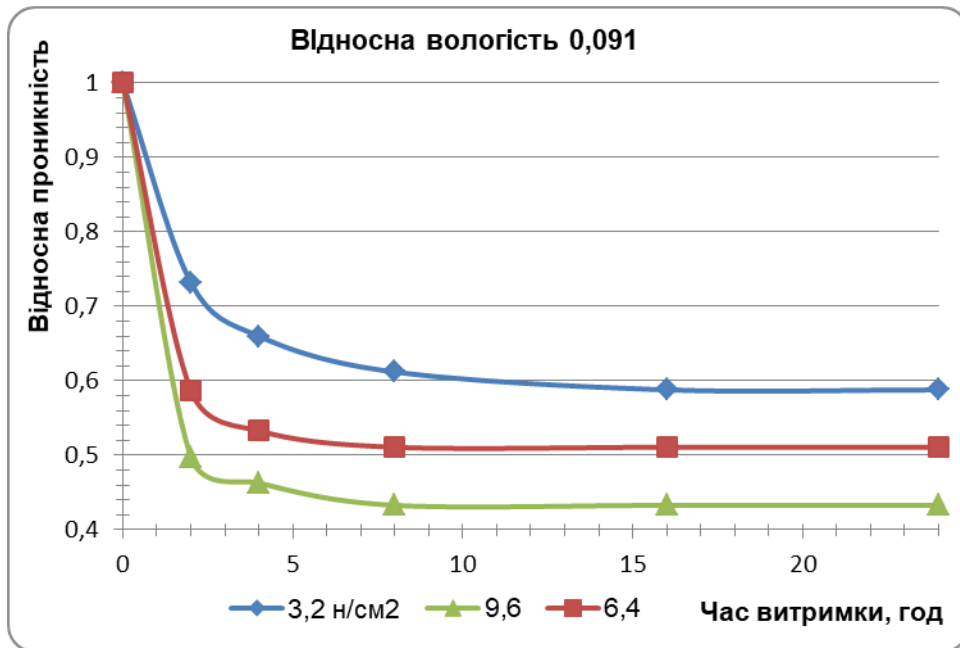


Рисунок 4 – Залежність проникності ґрунту від часу витримання під навантаженням

$$m = W_g / W, \quad (7)$$

де

$$W_g = \Delta V_r \frac{P_a}{P_1 - P_2}, \quad (8)$$

де P_a - атмосферний тиск.

З іншого боку, критичне значення числа Рейнольдса можна розрахувати за формулою

$$Re_{кр} = 1,38 * 10^{-6} d_0 \sqrt[3]{\frac{g\eta}{\rho J^2}} \sqrt[4]{1 + 2 * 10^{15} J^2}, \quad (9)$$

$$J = \rho g d_0 / P_{кр}, \quad (10)$$

де $P_{кр}$ – критичний тиск.

З (6) і (7) знаходилось значення критичної швидкості повітря в контейнері з пробєю ґрунту $w_{кр}$ і далі об'ємна витрата повітря через лічильник з умови дотримання лінійної фільтрації

$$Q \leq w_{кр} \pi D^2 / 4. \quad (11)$$

Серед незалежних факторів, які мають вплив на величину коефіцієнта проникності ґрунту, були вибрані наступні:

- внутрішній тиск ґрунту, σ ;
- вологість ґрунту, φ ;
- щільність сухого ґрунту ρ ;
- діаметр гранул d_0 .

Кожен із незалежних параметрів міг приймати в даній серії дослідів 5 конкретних значень. Як функцію-відгук вибрано коефіцієнт проникності ґрунту k .

Таким чином, функціональні залежності функції-відгуку від незалежних параметрів будувались по п'яти рівнях з метою отримання формули вигляду

$$k = F(\sigma, d_0, \varphi, \rho). \quad (12)$$

Умови проведення серій дослідів наведено в таблиці 2.

Результати досліджень обробляли за методикою, яка базується на розробці І. І. Протодьяконова і М. О. Тедера. В основу її покладено поняття про комбінаційний квадрат (рис. 5), заповнення якого є результатами експериментів і дозволяє скоротити число дослідів (при п'яти рівнях реалізації кожної залежності) з 625 до 25.

На основі комбінаційного квадрату складаються матриці, подані в таблицях 3 і 4 відповідно.

Числові значення функції-відгуку усереднювались у горизонтальних рядках і вертикальних стовбцях і за результатами усереднення побудовано графіки, які оброблялися за методом найменших квадратів. У результаті кожна із залежностей була апроксимована відповідною формулою. Для залежності коефіцієнта проникності від внутрішнього тиску та вологості ґрунту і на основі аналізу вигляду графіків (рис. 6) вибрана формула

$$k = \alpha_0 \exp(-\beta \sigma^n \varphi^m). \quad (13)$$

Решта залежності апроксимувалися степеневими залежностями

$$k = \alpha_1 \rho^{n1}, \quad (14)$$

$$k = \alpha_2 d^{n2}. \quad (15)$$

Таблиця 2 – Умови проведення експерименту

№ з/п	ПАРАМЕТРИ				Функція-відгук, k, d
	σ , н/см ²	φ	ρ , г/см ³	d_0 , мм	
1	0	0	2,8	2	0,745
2	2,4	0,048	2,7	2	0,689
3	4,8	0,091	2,6	2	0,466
4	7,2	0,13	2,5	2	0,212
5	9,6	0,17	2,4	2	0,055
6	0	0,048	2,4	1,5	0,621
7	2,4	0,091	2,8	1,5	0,431
8	4,8	0,13	2,7	1,5	0,217
9	7,2	0,17	2,6	1,5	0,064
10	9,6	0	2,5	1,5	0,615
11	0	0,091	2,5	1	0,453
12	2,4	0,13	2,4	1	0,227
13	4,8	0,17	2,8	1	0,073
14	7,2	0	2,7	1	0,446
15	9,6	0,048	2,6	1	0,374
16	0	0,13	2,6	0,5	0,061
17	2,4	0,17	2,5	0,5	0,079
18	4,8	0	2,4	0,5	0,272
19	7,2	0,048	2,8	0,5	0,225
20	9,6	0,091	2,7	0,5	0,131
21	0	0,17	2,7	0,2	0,133
22	2,4	0	2,6	0,2	0,136
23	4,8	0,048	2,5	0,2	0,119
24	7,2	0,091	2,4	0,2	0,075
25	9,6	0,13	2,8	0,2	0,029

Таблиця 3 – Обробка результатів дослідів за параметрами σ , φ

$\varphi \backslash \sigma$, н/см ²	0	2,4	4,8	7,2	9,9	$\sum f_i$	$F_1(\varphi)$
0	0,745	0,136	0,272	0,446	0,615	2,217	0,443
0,048	0,621	0,689	0,119	0,225	0,374	2,028	0,406
0,091	0,453	0,431	0,466	0,075	0,131	1,556	0,311
0,13	0,061	0,227	0,217	0,212	0,029	0,746	0,149
0,17	0,133	0,079	0,073	0,064	0,055	0,404	0,081
$\sum f_i$	2,013	1,562	1,147	1,022	1,204	-	-
$F_2(\sigma)$	0,403	0,312	0,229	0,204	0,241	-	-

Таблиця 4 – Обробка результатів дослідів за параметрами $R i d$

d , мм $\backslash \rho$, г/см ³	2,8	2,7	2,6	2,5	2,4	$\sum f_i$	$F_3(d)$
2	0,745	0,689	0,466	0,212	0,055	2,167	0,433
1,5	0,431	0,217	0,064	0,615	0,621	1,948	0,389
1	0,073	0,446	0,374	0,433	0,227	1,553	0,311
0,5	0,225	0,131	0,061	0,079	0,272	0,768	0,154
0,2	0,029	0,133	0,136	0,119	0,075	0,492	0,098
$\sum f_i$	1,503	1,616	1,101	1,458	1,250	-	-
$F_4(\rho)$	0,301	0,323	0,220	0,292	0,250	-	-

		Po1					Po2					Po3					Po4					Po5					
		Ro1					Ro2					Ro3					Ro4					Ro5					
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	
To1	d1	1	■																								
		2																									
		3																									
		4																									
		5																									
To2	d2	1																									
		2																									
		3																									
		4																									
		5																									
To3	d3	1																									
		2																									
		3																									
		4																									
		5																									
To4	d4	1																									
		2																									
		3																									
		4																									
		5																									
To5	d5	1																									
		2																									
		3																									
		4																									
		5																									

Рисунок 5 – Комбінаційний квадрат

Загальна математична модель для багатофакторної функції знаходилась як добуток

$$F(x_1, x_2, x_3, x_4) = \alpha f(x_1, x_2) \cdot f(x_3) \cdot f(x_4). \quad (16)$$

Усереднений коефіцієнт α знаходився методом найменших квадратів за даними таблиці 2. У результаті отримано емпіричну залежність, що має вигляд

$$k = 0.55 \cdot d_0^{0.75} \rho^{-0.21} \exp(-31.5\varphi^{2.1} \sigma^{0.55}), \quad (17)$$

де k – коефіцієнт проникності, дарсі;

d_0 – діаметр гранул, мм;

φ – вологість ґрунту;

σ – внутрішній тиск, н/см².

Одержана залежність добре корелює з аналітичними виразами, одержаними на основі реалізації математичної моделі, що підтверджує достовірність проведених досліджень.

Оцінка точності розрахунків проводилася на основі даних, наведених у таблиці 2. Для цього визначалася середньоквадратична похибка за формулою

$$\sigma = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_1^n (X_{cp} - X_i)^2}, \quad (18)$$

де n – число дослідів;

X_{cp}, X_i – середньоарифметичне і біжуче значення вимірюваної величини.

Ширина гарантійного інтервалу

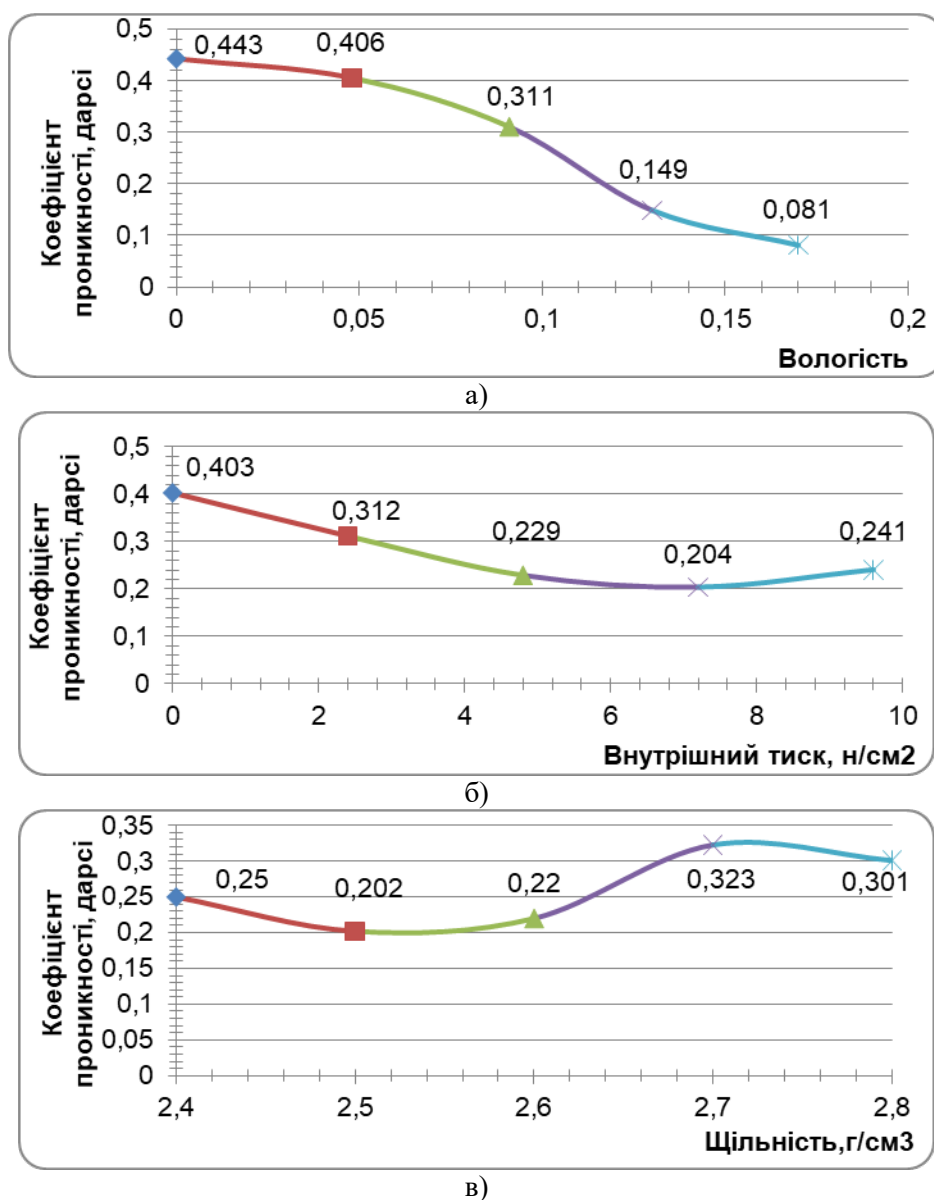
$$\Delta X = \frac{\sigma t_{\alpha;n}}{n-1}, \quad (19)$$

де $t_{\alpha;n}$ – коефіцієнт Стюдента.

Тоді гарантійний інтервал складе ($X_{cp} - \Delta X \leq X \leq X_{cp} + \Delta X$). Результати розрахунків для різних показників у таблиці 3 подано в таблиці 5.

Слід відзначити, що створена математична модель справедлива тільки для умов лінійної фільтрації газу в ґрунті.

Загальний процес формування ареалу загазованості пропонується поділити на дві нестационарні фази. Перша фаза починається з моменту виникнення витoku і закінчується досяг-



а) – залежність коефіцієнта проникності середовища від вологості;
 б) – залежність коефіцієнта проникності середовища від внутрішнього тиску;
 в) – залежність коефіцієнта проникності середовища від щільності середовища

Рисунок 6 – Графічні залежності до побудови багатofакторної моделі

ненням 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 (за умови 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 крізь корозійний отвір вважається сталою в часі.

Таблиця 5 – Значення гарантійних інтервалів

Показник	Гарантійний інтервал
α	(0,545;0,555)
n_1	(0,44;0,46)
n_2	(0,031;0,035)
n_3	(0,031;0,035)
σ	(0,0012;0,0017)

Математична модель плоскої нестационарної фільтрації газу в ґрунті побудована на основі рівняння лінійної фільтрації у формі Дарсі та рівняння нерозривності. Для одномірного руху газу маємо

$$w = \frac{k}{\eta} \frac{\partial P}{\partial x}, \quad (20)$$

$$-\frac{\Delta P}{\partial t} = \frac{\partial(\rho w)}{\partial x}. \quad (21)$$

Переходом від одномірної моделі до плоскої після нескладних перетворень для швидкості фільтрації рівняння плоскої задачі отримуємо математичну модель у вигляді

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = \frac{kc^2 \rho}{\eta} \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \right) - \frac{kc^2 \rho}{\eta} \frac{q}{F} \delta(x - x_g) \delta(y - y_g), \quad (22)$$

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

x_g, y_g – координати точкового джерела інтенсивності q ;

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

F – площа перерізу фільтрації.

Позначимо

$$\alpha = \frac{kc^2 \rho}{\eta}, \quad (23)$$

де c – швидкість розповсюдження звуку в середовищі;

ρ – густина газу.

Тоді отримаємо диференціальне рівняння плоскої фільтрації газу в пористому середовищі у вигляді

Аналогічно для розподілу тисків у пористому середовищі математична модель має вигляд

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \right) - \alpha \frac{q}{F} \delta(x - x_g) \delta(y - y_g). \quad (24)$$

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial P}{\partial t} - q \frac{c^2}{\alpha} \delta(y - H) \delta(x - l) - q \zeta \sigma(y - H) \delta(x - l), \quad (25)$$

де H – глибина розміщення витoku 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 вважалось, 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

$$\omega(x, y, 0) = 0; \omega(0, h, t) = 0; \omega(\infty, h, t) = 0, \quad (26)$$

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

$$\omega(x, y, t) = \frac{q}{2\pi F} \int_0^\infty \frac{\sin \lambda y_g \sin \lambda y}{\lambda} \times \left[\left[\sigma(x - x_g) - 1 \right] \left[e^{-\lambda(x_g - x)} \operatorname{erfc} \left(\frac{x_g - x}{2\sqrt{\alpha t}} - \lambda\sqrt{\alpha t} \right) - e^{-\lambda(x_g - x)} \operatorname{erfc} \left(\frac{x_g - x}{2\sqrt{\alpha t}} + \lambda\sqrt{\alpha t} \right) \right] - \sigma(x - x_g) \left[e^{-\lambda(x - x_g)} \operatorname{erfc} \left(\frac{x - x_g}{2\sqrt{\alpha t}} - \lambda\sqrt{\alpha t} \right) - e^{-\lambda(x - x_g)} \operatorname{erfc} \left(\frac{x - x_g}{2\sqrt{\alpha t}} + \lambda\sqrt{\alpha t} \right) \right] \right] d\lambda, \quad (27)$$

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

$$\sigma = \begin{cases} 1, & \text{якщо } x > x_g \\ 0, & \text{якщо } x \leq x_g \end{cases}. \quad (28)$$

Використавши перше рівняння системи (20, 21) (рівняння Дарсі), на основі (27) отримаємо залежність для розподілу тиску в ґрунті від поверхні ($y = 0$), де тиск вважається атмосферним до витoku з трубопроводу ($y = H$)

$$P(x, y, t) = P_a + \frac{\eta}{k} \int_0^H w(x, y, t) dt. \quad (29)$$

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

Для другої фази нестационарного процесу формування ареалу забруднень витокami з газопроводу розглядається плоска задача фільтрації газу в пористому середовищі при виникненні точкового джерела, яким є 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 прирівняним до атмосферного

$$P(x, y, 0) = P_a. \quad (30)$$

Нехай на поверхні ґрунту і на значній віддалі від діючого 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 таких 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.

Аналіз залежності (6) показує, що навіть за сталого тиску всередині ємності і сталому діаметрі отвору масова витрата витоку газу не може бути сталою в часі за умов докритичного витікання, оскільки змінюється зовнішній тиск P_l .

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

$$P(x, y, t) = P_a + \frac{q}{2\pi} \int_0^\infty \frac{\sin \lambda y_0 \sin \lambda y}{\lambda} \times \left\{ \left[\sigma(x-x_0) - 1 \right] \left[e^{-\lambda(x_0-x)} \operatorname{erfc} \left(\frac{x_0-x}{2\sqrt{\lambda t}} - \lambda\sqrt{\lambda t} \right) - e^{-\lambda(x_0-x)} \operatorname{erfc} \left(\frac{x_0-x}{2\sqrt{\lambda t}} + \lambda\sqrt{\lambda t} \right) \right] - \sigma(x-x_0) \times \left[e^{-\lambda(x-x_0)} \operatorname{erfc} \left(\frac{x-x_0}{2\sqrt{\lambda t}} - \lambda\sqrt{\lambda t} \right) - e^{-\lambda(x-x_0)} \operatorname{erfc} \left(\frac{x-x_0}{2\sqrt{\lambda t}} + \lambda\sqrt{\lambda t} \right) \right] \right\} d\lambda. \quad (31)$$

Розв'язок залежності (31) дозволяє 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.

Встановити характер зміни масової витрати витоку впродовж першої і другої фаз нестационарної фільтрації газу в пористому середовищі в аналітичній формі неможливо, оскільки тиск і витрата витоку взаємно пов'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 на-

ближенні тиск середовища за отвором приймаємо рівним атмосферному P_a .

Діапазон часу нестационарного витікання газу розбивається на дискретні проміжки Δt , впродовж яких процес можна вважати квазістаціонарним. На початку першого часового інтервалу витрата витоку визначається з залежності (6) і вважається сталою. Це дає змогу використати для визначення швидкості фільтрації w і тисків в поровому середовищі (ґрунті) залежності (27), (28) і (29). За знайденою за (29) швидкістю фільтрації w і проміжками часу Δt визначається висота проникнення газу в ґрунт

$$y_i = w \cdot \Delta t. \quad (32)$$

Якщо $y_i < H$ (глибина залягання трубопроводу), то має місце перша фаза нестационарної визначається із залежності (29). В іншому випадку має місце друга фаза нестационарної фільтрації газу в ґрунті, і тиск визначається за (31). Знаючи тиск газу $P(0, 0, t)$ в довкіллі, уточнюємо величину витрати газу за (6). Ітераційний процес триває до досягнення необхідної точності δq у визначенні витрати і закінчується після виконання умови

$$|G^{(s)} - G^{(s-1)}| < \delta q. \quad (33)$$

Після досягнення виконання умови (33) 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 фаз нестационарної фільтрації.

Висновки

1. Для оцінки впливу фізичних характеристик ґрунту і встановлення залежності коефіцієнта проникності ґрунту від зовнішніх факторів проводились серії експериментальних досліджень.

2. Експериментальним шляхом встановлено залежність проникності вологого ґрунту з певним внутрішнім тиском від часу витримання зразка під навантаженням. Отримано відповідні емпіричні залежності.

3. Виконані експериментальні дослідження фільтраційних характеристик ґрунтів дозволили встановити їх залежності від зовнішніх і внутрішніх факторів.

Література

References

1. Гончарук М.І. Аналіз причин втрат природного газу. *Нафтова і газова промисловість*. 2003. № 1. С. 51-53.
2. Грудз Я.В., Дрін Н.Я., Шологон В.Д., Стасюк Р.Б., Мартинюк Р.Т. Дослідження впливу температурного режиму газопроводів на енергоефективність транспорту газу. *Нафтогазова енергетика*. 2011. № 2. С. 43-47.
3. Грудз В.Я., Грудз Я.В., Дрін Н.Я., Стасюк Р.Б. Дослідження процесу фільтрації газу в ґрунті у разі появи витоків із газопроводу. *Нафтогазова енергетика*. 2014. №1(21). С. 70-74.
4. Грудз В.Я., Запукхляк В.Б., Грудз В.Я. (мол.), Побережний Л.Я., Дрін Н.Я., Стасюк Р.Б. Прогнозування потенційних ризиків виникнення витоків на газопроводах. *Вісник Тернопільського національного технічного університету*. 2019. №4. С. 78-81.
5. Гончарук М.І. Корозія та розгерметизація газопроводів. *Нафтова і газова промисловість*. 2003. № 2. С. 56-57.
6. Гончарук М.І., Крижанівський Є. І., Побережний Л. Я. Корозійно-механічна поведінка металу газопроводу. *Науковий вісник Національного технічного університету нафти і газу*. 2003. № 1(5). С. 54-59.
7. Грудз В.Я., Грудз Я.В., Фейчук В.Д. Діагностування малих витоків з трубопроводу. *Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ*. 1999. №36. С.42-44.
8. Грудз В.Я., Грудз Я.В., Фейчук В.В., Дрін Н.Я., Стасюк Р.Б. Математичне моделювання фільтрації газу в ґрунті внаслідок виникнення малих витоків в газопроводі. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2011. №3(40). С. 66-69.
9. Грудз В.Я., Грудз Я.В., Дрін Н.Я., Дем'янчук Я.М. Вплив фільтраційного опору ґрунту на інтенсивність аварійних витоків із газопроводу. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2015. №2(55). С. 68-73.
10. Дрін Н.Я. Оценивание величины потерь газа и площади загрязнения при повреждении магистрального газопровода. *Надежность безопасность магистрального трубопроводного транспорта: Материалы 7 международной научно-технической конференции, г. Новополюцк, 22-25 Ноября 2011 г. Новополюцк*, 2011. С. 20-22.

1. Honcharuk M.I. Analiz prychnyn vtrat pryrodnoho hazu. *Naftova i hazova promyslovist*. 2003. No 1. P. 1-53. [in Ukrainian]
2. Hrudz Ya.V., Drin N.Ia., Sholohon V.D., Stasiuk R.B, Martyniuk R.T. Doslidzhennia vplyvu temperaturnoho rezhymu hazoprovodiv na enerhoefektyvnist transportu hazu. *Naftohazova enerhetyka*. 2011. No 2. P. 43-47. [in Ukrainian]
3. Hrudz V.Ia., Hrudz Ya.V., Drin N.Ia., Stasiuk R.B. Doslidzhennia protsesu filtratsii hazu v grunti u razi poiavy vytokiv iz hazoprovodu. *Naftohazova enerhetyka*. 2014. No 1(21). P. 70-74. [in Ukrainian]
4. Hrudz V.Ia., Zapukhliak V.B, Hrudz V.Ia. (mol.), Poberezhnyi L.Ia., Drin N.Ia., Stasiuk R.B. Prohnozuvannia potentsiinykh ryzykiv vynyknennia vytokiv na hazoprovodakh. *Visnyk Ternopil'skoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu*. 2019. No 4. P. 78-81. [in Ukrainian]
5. Honcharuk M.I. Koroziiia ta rozgermetyzatsiia hazoprovodiv. *Naftova i hazova promyslovist*. 2003. No 2. P. 56-57. [in Ukrainian]
6. Honcharuk M.I., Kryzhanivskiy Ye. I., Poberezhnyi L. Ya. Koroziiino-mekhanichna povedinka metalu hazoprovodu. *Naukovyi visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu nafty i hazu*. 2003. No 1(5). P. 54-59. [in Ukrainian]
7. Hrudz V.Ia., Hrudz Ya.V., Feichuk V.D. Diahnostuvannia malykh vytokiv z truboprovodu. *Rozvidka i rozrobka naftovykh i hazovykh rodovyshch*. 1999. No 36. P.42-44. [in Ukrainian]
8. Hrudz V.Ia., Hrudz Ya.V., Feichuk V.V., Drin N.Ia., Stasiuk R.B. Matematyчне modeliuвання filtratsii hazu v grunti vnaslidok vynyknennia malykh vytokiv v hazoprovodi. *Rozvidka ta rozrobka naftovykh i hazovykh rodovyshch*. 2011. No 3(40). P. 66-69. [in Ukrainian]
9. Hrudz V.Ia., Hrudz Ya.V., Drin N.Ia., Demianchuk Ya.M. Vplyv filtratsiinoho oporu gruntu na intensyvniat avariinykh vytokiv iz hazoprovodu. *Rozvidka ta rozrobka naftovykh i hazovykh rodovyshch*. 2015. No 2(55). P. 68-73. [in Ukrainian]
10. Drin N.Ya. Otsenivanie velichiny poter gaza i ploschadi zagryazneniya pri povrezhdenii magistralnogo gazoprovoda. *Nadezhnost bezopasnost magistralnogo truboprovodnogo transporta: Materialy 7 mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii, Novopolotsk, 22-25 Noyabrya 2011 g. Novopolotsk*, 2011. P. 20-22. [in Russian]