

А. П. Олійник, О. М. Туць
Івано-Франківський національний
технічний університет нафти і газу

КОМПЛЕКСНИЙ МАТЕМАТИЧНИЙ ПРОЦЕС ПОШИРЕННЯ ШКІДЛИВИХ РЕЧОВИН ПРИ АВАРІЯХ НА МАГІСТРАЛЬНИХ ГАЗОПРОВОДАХ

У статті наведено результати аналізу науково-технічної літератури та інших джерел інформації стосовно забруднення ґрунтів при аваріях на об'єктах трубопровідного транспорту. Система газопостачання в Україні являє собою складну енергетичну систему, яка характеризується великою довжиною, значною потужністю, складною структурою, різним віком і станом магістральних газопроводів. Старіння газопроводів, велике число аварій, відмов та ушкоджень на лінійній частині ускладнюють процес технічної експлуатації газотранспортної системи та збільшують матеріальні витрати.

У цих умовах актуальним є питання підвищення екологічної безпеки з метою запобігання аварій, безперебійного постачання природного газу, зниження втрат та негативного впливу на навколишнє середовище.

Встановлено, що при глибині прокладання газопроводу 1,5 м концентрація шкідливої речовини на поверхні землі практично рівна нулю. Крім того, математична модель дозволяє оцінити величину зони впливу джерела шкідливих речовин по всій території досліджуваної зони, в якій прокладено один або декілька трубопроводів.

Проведені розрахунки носять тестовий характер, для вивчення реальних аварійних ситуацій необхідно мати інформацію про наступні фактори: швидкість прийняття заходів по відключенню аварійної ділянки; фізико-механічні параметри ґрунтів; робочий тиск в трубопровідній системі.

Тому запропонована математична модель дасть можливість проаналізувати поширення продуктів аварійного витоку залежно від місця локалізації аварійних витоків природного газу властивостей ґрунтів, швидкості реагування та поширення аварійної ситуації.

Ключові слова: газопроводи, забруднення, довкілля, ґрунти, екологічна безпека.

Вступ. Однією з найважливіших проблем, що виникають внаслідок антропогенної діяльності є забруднення ґрунтів при аваріях на об'єктах трубопровідного транспорту. Тематиці досліджень присвячено значну кількість робіт [1-4, 6-9], в яких науковці вказану проблему вирішують шляхом аналізу явища забруднення через розбиття його на певні етапи: зміна рівня ґрунтових вод, поширення шкідливих речовин, визначення гранично допустимих концентрацій. Загальну схему розв'язання такого роду задачі наведено в роботі [7], проте це вимагає деталізації для конкретних систем. При вирішенні проблеми водопостачання великих міст використовуються відкриті джерела (ріки, озера, водосховища), а також підземні води пластів. Тому частково проблема зміни напрямку руху забрудненої води може бути вирішена шляхом побудови свердловин, в які закачують чисту воду, вказане закачування створює примусовий рух ґрунтових вод, забруднених внаслідок діяльності людини, що створює перешкоду подальшому переміщенню забруднень вздовж пласта.

Математична модель, що реалізує вказану схему, містить рівняння фільтрації ґрунтових вод та рівняння поширення ділянок, які доповнюються вхідними даними (властивості ґрунтів, води та домішок, даними про геометрію області, крайовими та початковими умовами, тощо).

Математична модель процесу. Модель поширення домішок одержується із закону збереження маси домішок в елементі ґрунту, ця модель описується рівнянням нерозривності і в найпростішому варіанті має вигляд [3]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(C(H+h)) + \frac{\partial}{\partial x}(C(H+h)u) + \frac{\partial}{\partial y}(C(H+h)v) = Q(x,y,t), \quad (1)$$

де $C(x,y,t)$ – шукана концентрація домішок; $h(x,y,t)$ – рівень ґрунтових вод; $H(x,y,t)$ – поверхня, через яку не проникають ґрунтові води; u, v – компоненти швидкості. Враховуючи, що за законом Дарсі [3]:

$$\begin{aligned} u &= -\frac{k}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x}, \\ v &= -\frac{k}{\mu} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{k g p}{\mu}, \quad p = \rho g h \end{aligned} \quad (2)$$

враховуючи (2) рівняння (1) може бути подане у вигляді:

$$\frac{\partial}{\partial t} (C(H+h)) - \frac{k}{\mu} \rho g \frac{\partial}{\partial x} \left[C(H+h) \frac{\partial h}{\partial x} \right] - \frac{k}{\mu} g \rho \frac{\partial}{\partial y} \left[C(H+h) \frac{\partial h}{\partial y} \right] = Q(x, y, t), \quad (3)$$

з урахуванням закону Фіка [3]:

$$w = -D \text{grad } C, \quad (4)$$

де в (4) w – вектор швидкості, $D > 0$ – коефіцієнт гідродинамічної дисперсії; рівняння (3) може бути записаним у вигляді [7]:

$$\frac{\partial}{\partial t} [C(H+h)] = \frac{\partial}{\partial x} \left[D(H+h) \frac{\partial C}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[D(H+h) \frac{\partial C}{\partial y} \right] = Q(x, y, t). \quad (6)$$

Граничні та початкові умови задачі передбачають задання допустимого рівня ґрунтових вод, розподілу тиску в пластах та початкові концентрації домішок, а також розподіл тиску та концентрації по границі досліджуваної області. Особливістю аварійних ситуацій є великий градієнт тиску газу, що транспортується по відношенню до пластового тиску.

Одним з природніх способів переходу до дискретної моделі – апроксимація різницевиими схемами двох рівнянь – рівняння Бусінеска, яке не містить C і для неоднорідного середовища записується у вигляді:

$$\frac{m(x,y)}{\rho y} \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu(x,y)(H+h) \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu(x,y)(H+h) \frac{\partial h}{\partial y} \right] + \varphi(x, y, t), \quad (7)$$

де $\varphi(x, y)$ – інтенсивність забруднення в точці (x, y) в деякий момент часу t ; $m(x, y)$ – маса елемента ґрунту; $\mu(x, y)$ – в'язкість, і рівняння (6).

Оскільки (7) не містить величини C , доцільним є використання безумовно стійких неявних схем, що дозволяє проводити розрахунок з достатньо великим кроком по часу та по відповідних координатах. При цьому загальна схема розв'язання нелінійних різницевих рівнянь є наступною: спочатку з різницевого аналога рівняння (7) знаходяться невідомі величини $h_j^i = h(x_i, y_j, t)$, де (x_i, y_j) – точки різницевої сітки, після чого вказані величини використовуються в різницевих рівняннях для визначення C_j^i , звідки останні і визначаються. При розв'язанні дискретних аналогів рівнянь (7) та (6) використовуються стандартний метод змінних напрямків, який полягає в послідовному розв'язанні за методом прогонки набору одновимірних задач, а у випадку, коли (7) передбачає використання умови $\frac{\partial h}{\partial t} = 0$ – метод верхньої релаксації для еліптичного рівняння.

Реалізація моделі та чисельний алгоритм. При визначенні значень $h(x, y, t)$ рівняння (7) може бути перетвореним на основі наступних допущень [3]:

1) Течія рідини розглядається в циліндричній формі і є симетричною відносно вертикальної осі, фактично, розглядається течія в прямокутній області.

2) Динамічна в'язкість μ та густина ρ вважаються сталими.

3) Температура та проникність середовища вважаються сталими.

4) Тиск в області визначається початковими значеннями атмосферного тиску та рівняння $H_0 = h(x_m, y_m, t_0)$, враховуються також технологічні параметри відповідних процесів. При цьому (7) може бути замінена моделлю Дарсі:

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \\ u = -\frac{k}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \\ v = -\frac{k}{\mu} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{k \rho g}{\mu} \end{cases}, \quad (8)$$

коли умова $v \gg v^2$ не виконується, використовується закон Форхгеймера [4]:

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \\ -\frac{\partial p}{\partial x} - \frac{\mu}{k} u - \beta \frac{\rho V^2}{v_k} \frac{u}{V} = 0 \\ -\frac{\partial p}{\partial y} + \rho g - \frac{\mu}{k} v - \beta \frac{\rho V^2}{\sqrt{k}} \frac{v}{V} = 0 \end{cases}, \quad (9)$$

де β – безрозмірний коефіцієнт, який залежить від структури пористого середовища, $\beta \approx 1$; k – коефіцієнт, який за розмірністю співпадає з коефіцієнтом проникності; V – характерна швидкість фільтрації. Система (8) або (9) доповнюються граничними умовами виду:

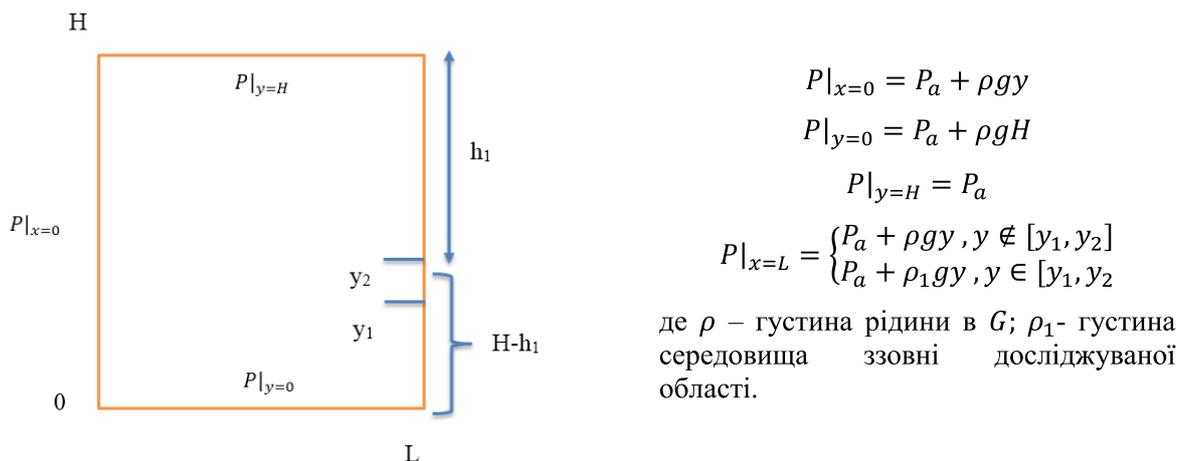
$$\rho \partial_G = f(x, y), \quad (10)$$

де $f(x, y)$ – неперервна функція в досліджуваній області G – якщо розподіл тиску по границі є неперервним, або ж кусково-неперервною – в тому випадку, коли границя G має частини, непроникні для рідини.

Розв'язок задачі з кусково-неперервною функцією $f(x, y)$ в (10) дозволяє вивчити розмір зони впливу наявності витоків з області на конфігурацію течії в цілому, а також вивчити поведінку течії в залежності від того, а яке середовище відбувається витік рідини. При цьому задачі (8) та (9) з математичної точки зору зводяться до задачі Діріхле для тиску рідини:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} = 0, \quad (11)$$

з граничними умовами типу (10).



Задача розв'язується методом верхньої релаксації, в роботі [8] встановлено залежність між значеннями параметрів релаксації та збіжністю ітераційного процесу.

Рівняння (6) розв'язується за методом змінних напрямків [7] з використанням знайдених на попередньому кроці значень функції $h(x, y, t)$:

$$h(x_i, y_j, t) = \frac{P(x_i, y_j, t) - P_a}{\rho y}, \quad (12)$$

При цьому рівняння (6) при його чисельній реалізації зводиться до системи лінійних алгебраїчних рівнянь з тридіагональною матрицею з урахуванням граничних умов для концентрації домішок та структури функції щільності джерел домішок $Q(x, y, t)$.

Результати досліджень. При чисельній реалізації методу проведено розрахунки тиску та рівня рідини в досліджуваній області. Досліджено вплив наявності ділянок, в яких рідина проникає за її межі, а виток рідини чинить вплив на конфігурацію течії.

На рис. 1 показано, що швидкість витoku рідини з досліджуваної області тим вища, чим глибше знаходиться зона витoku, крім того, результати розрахунків, подані на рис. 1, засвідчують, що зміна величини горизонтальної компоненти швидкості є чутливою лиш в невеликому околі біля зони витoku.

На рис. 2 наведено розподіл концентрацій домішок при певному вигляді функції $Q(x, y, t)$, що характеризує щільність джерел забруднень при різних конфігураціях розподілу коефіцієнта дифузії.

На рис. 3 подано розподіл концентрації домішок по глибині, якщо глибина зони, на якій відбувається забруднення, складає 1,5 км. Встановлено, що при такій глибині концентрація шкідливої речовини на поверхні землі практично рівна нулю. Крім того, можна оцінити величину зони впливу джерела шкідливих речовин по ширині досліджуваної зони.

Проведені розрахунки носять тестовий характер, для вивчення реальних аварійних ситуацій необхідно мати інформацію про наступні фактори:

- швидкість прийняття заходів по відключенню аварійної ділянки;
- фізико-механічні параметри гунтів;
- робочий тиск в трубопровідній системі.

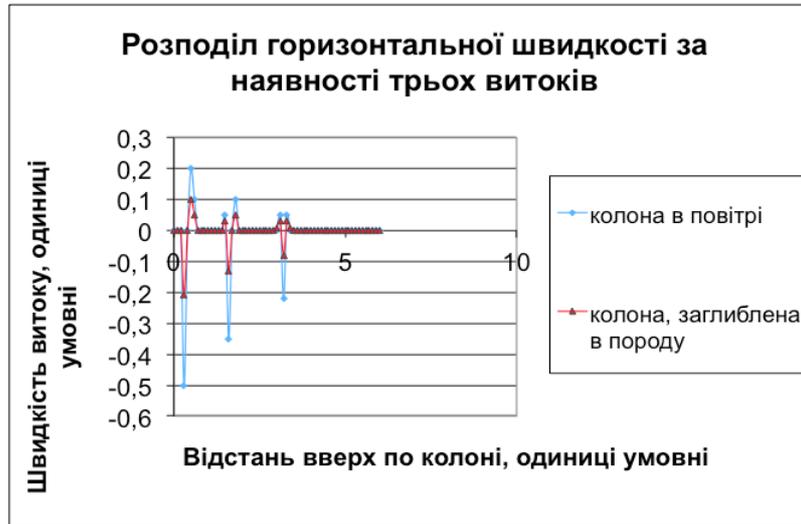


Рис. 1. Розподіл горизонтальної компоненти швидкості за наявністю трьох витоків

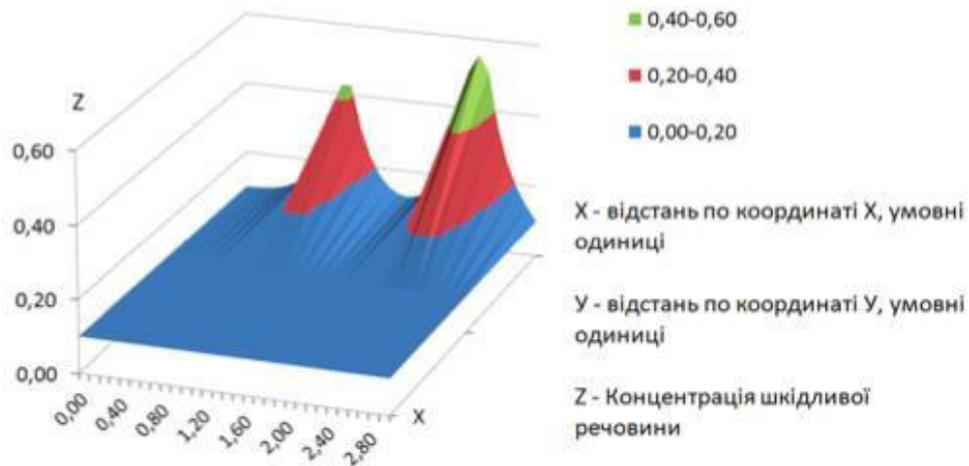


Рис. 2. Розподіл концентрації шкідливої речовини в модельній області за наявності витоків різної інтенсивності

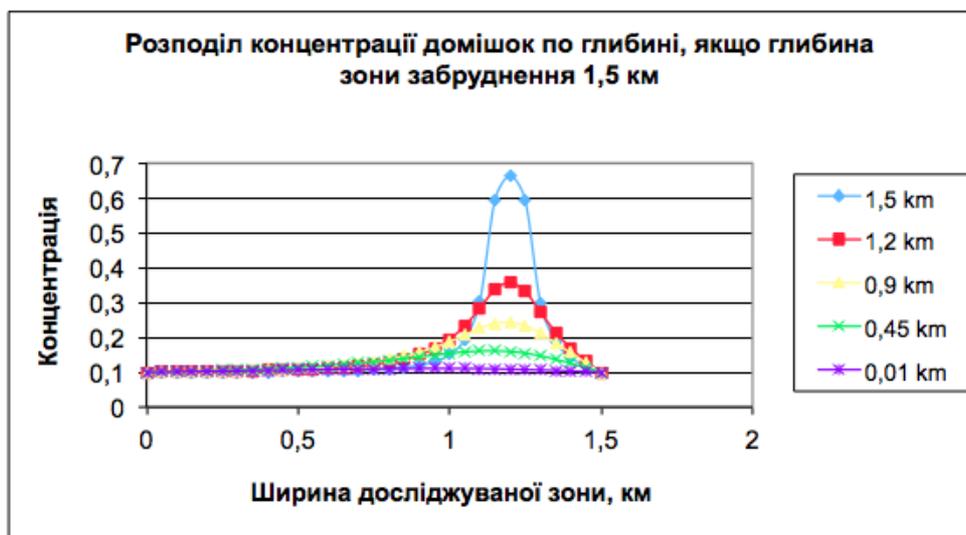


Рис. 3. Розподіл концентрації домішок на різних глибинах

При цьому поширення шкідливих речовин може мати таку картину (рис. 5, 6):

- верхня поверхня труби $\alpha=90^\circ$.

Викид має місце перпендикулярно осі труби, визначається перепадом тиску $p = p_0 - kx$, k - перепад тиску, при цьому величина k залежить від того, як швидко відповідні служби зупинять транспорт вуглеводнів аварійною ділянкою газопроводу.

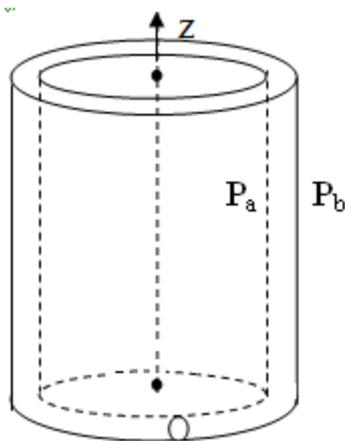


Рис. 4. Фрагмент труби

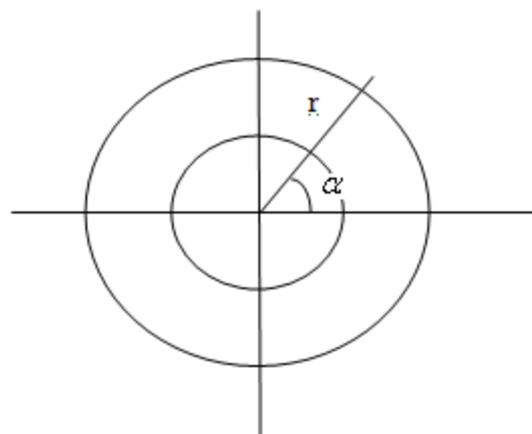


Рис. 5. Вибір координат в перерізі

При умові $k < 1$ реалізується стандартна модель дифузії (8):

$$0 \leq \alpha < 90$$

$$p = p_a + \rho g y + p_d$$

де p_a – атмосферний тиск; $\rho g y$ – тиск ґрунту на глибині залягання трубопроводу; p_d – тиск при втраті суцільності трубопроводом. Величина витoku залежить від p_d та комплексу $p_a + \rho g y$, вона обумовлює величину зони забруднення. Такі ж закономірності справедливі і для $0^\circ < \alpha < 90^\circ$. При $\alpha = 90^\circ$ можна оцінити глибину, на яку проникає забруднююча речовина із залежності

$$p_d = \rho g y,$$

звідки визначаємо умову, що робочий тиск в трубопроводі скадає 1 МПа. Густина породи 8000 кг/м куб, то глибина проникнення зарулюючх речовин в ґрунт сягає 12,5 метрів .

Висновки. Основними результатами роботи є :

- побудова комплексного математичного процесу поширення шкідливих речовин на основі рівняння Бусінеска та рівняння нерозривності з метою вивчення особливостей забруднення підземних вод;
- встановлення та реалізація широкого спектру граничних та початкових умов;
- розробка алгоритмів чисельної реалізації моделей на основі методів змінних напрямків для параболічного та методу верхньої релаксації для еліптичного рівняння;
- розробка програмного комплексу реалізації моделей;
- проведення тестових розрахунків для модельних зон забруднення ґрунтових вод.
- аналіз поширення продуктів аварійного витoku залежно від місця локалізації аварійних витоків властивостей ґрунтів, швидкості реагування на виникнення аварійної ситуації;
- отримання експрес-методу оцінки величини зони поширення продуктів, що транспортуються, в ґрунт при виникненні аварійних ситуацій.

Література

1 Мандрик О.М. Розвиток наукових основ підвищення рівня екологічної безпеки при транспортуванні природного газу: дис. на здоб. наук ступ. доктора техн. наук / О.М.Мандрик. Івано-Франківськ, 2013. 140 с.

2 Дубовой В.М., Квєгний Р.Н, Михальов О.І., Усов А.В. Моделювання та оптимізація систем : підручник. Вінниця: ПП «Едельвейс», 2017. 804 с.

- 3 Трубопровідний транспорт газу / М.П. Ковалко та ін. Київ: Агенство з раціонального використання енергії та екології, 2002. 600 с.
- 4 Олійник А.П. Математичні моделі процесу квазістаціонарного деформування трубопровідних та промислових систем при зміні їх просторової конфігурації: Наукове видання. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2010. 320 с.
- 5 Олійник А. П., Штаєр Л. О. Дослідження впливу параметрів релаксації на збіжність чисельного методу послідовної верхньої релаксації для задачі Діріхле. *Карпатські математичні публікації*. 2012. Т. 4, № 2. С. 289–296.
- 6 Олійник А.П., Мороз А.А. Математичне моделювання процесів забруднення ґрунтів як результату технологічних процесів. *МНТК «Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій»*. Тернопіль, 2015. С. 22-24.
- 7 Фізико-хімічна геотехнологія: навч. посібник [Текст] / М. М. Табаченко, О. Б. Владико, О. Є. Хоменко, Д. В. Мальцев. Д.: Національний гірничий університет, 2012. 310 с.
- 8 Boger C. Production gas from its source. *Oilfield Review* [Текст] / Boger C., Kieschnick I., Lewis R. E. Waters G. Autumn 2006, P. 36-49.
- 9 Zhao C., Villiappan S. Finite element modeling of methane gas / Migration in coal seams. *Computers and structures*. 1995. V.55, No 4. P. 625–629.
- 10 Rice J. R., Cleary M. P. Some basic stress-diffusion solutions for fluid-saturated elastic porous media with compressible constituents. *Reviews of Geophysics and Space Physics*. 1992. No 14. P. 227–241.
- 11 Задачі термодифузії та методи їх розв'язку [Текст] / під ред. д.т.н. В. П. Ляшенко. Кременчук: КНУ ім. М. Остроградського, 2012. 112 с.

A. Oliinyk, O. Tuts
Ivano-Frankivsk National
Technical University of Oil and Gas

COMPLEX MATHEMATICAL PROCESS OF HARMFUL SUBSTANCES SPREAD DURING MAIN GAS PIPELINES ACCIDENTS

The article presents the analysis results of scientific and technical literature and other sources information on soil pollution during accidents at pipeline transportation facilities.

The gas supply system of Ukraine is a complex energy system characterized by long length, significant power, complex structure, different age and state of the main gas pipelines. The aging of gas pipelines, a large number of accidents, failures and damage to the linear part complicate the maintenance process of the gas transportation system and increase material costs.

In these conditions, the improvement of environmental safety to prevent accidents, the uninterrupted supply of natural gas, reduction of losses and negative impact on the environment are relevant issues. It has been established that with a gas pipeline laying depth of 1.5 m the concentration of harmful substance on the top of the ground is almost zero. In addition, the mathematical model makes it possible to estimate the impact area of the harmful substances source on the entire studied territory with one or several pipelines.

The performed calculations are of a test nature. To study the real emergency situations, it is necessary to have information about the following factors: the speed of measures on the fault section disconnection; physical and mechanical parameters of soils; working pressure in the pipeline system.

The proposed mathematical model will make it possible to analyze the spread of emergency leaks products depending on the location of emergency leaks of natural gas, properties of soils, speed of response and spread of an emergency situation.

Key words: gas pipelines, pollution, environment, soils, environmental safety.

References

- 1 Mandryk O.M. Rozvytok naukovykh osnov pidvyshchennia rivnia ekolohichnoi bezpeky pry transportuvanni pryrodnoho hazu: dys. na zdob. nauk stup. doktora tekhn. nauk / O.M.Mandryk. Ivano-Frankivsk, 2013. 140 s.

- 2 Dubovoi V.M., Kviehnyi R.N, Mykhalov O.I., Usov A.V. Modeliuvannia ta optymizatsiia system : pidruchnyk. Vinnytsia: PP «Edelveis», 2017. 804 s.
- 3 Truboprovodnyi transport hazu / M.P. Kovalko ta in. Kyiv: Ahenstvo z ratsionalnoho vykorystannia enerhii ta ekolohii, 2002. 600 s.
- 4 Oliinyk A.P. Matematychni modeli protsesu kvazistatsionarnoho deformuvannia truboprovodnykh ta promyslovykh system pry zmini yikh prostorovoi konfighuratcii: Naukove vydannia. Ivano-Frankivsk: IFNTUNH, 2010. 320 s.
- 5 Oliinyk A. P., Shtaier L. O. Doslidzhennia vplyvu parametriv relaksatsii na zbizhnist chyselnoho metodu poslidovnoi verkhnoi relaksatsii dlia zadachi Dirikhle. Karpatski matematychni publikatsii. 2012. T. 4, № 2. S. 289–296.
- 6 Oliinyk A.P., Moroz A.A. Matematyчне modeliuвання protsesiv zabrudnennia gruntiv yak rezultatu tekhnolohichnykh protsesiv. MNTK «Fundamentalni ta prykladni problemy suchasnykh tekhnolohii». Ternopil, 2015. S. 22-24.
- 7 Fyzyko-khimichna heotekhnolohiia: navch. posibnyk [Tekst] / M. M. Tabachenko, O. B. Vladyko, O. Ye. Khomenko, D. V. Maltsev. D.: Natsionalnyi hirnychi universytet, 2012. 310 s.
- 8 Boger C. Production gas from its source. Oilfield Review [Tekst] / Boger C., Kieschnick I., Lewis R. E. Waters G. Autumn 2006, R. 36-49.
- 9 Zhao C., Villiappan S. Finite element modeling of methane gas / Migration in coal seams. Computers and structures. 1995. V.55, No 4. P. 625–629.
- 10 Rice J. R., Cleary M. P. Some basic stress-diffusion solutions for fluid-saturated elastic porous media with compressible constituents. Reviews of Geophysics and Space Physics. 1992. No 14. P. 227–241.
- 11 Zadachi termodyfuzii ta metody yikh rozviazku [Tekst] / pid red. d.t.n. V. P. Liashenko. Kremenchuk: KNU im. M. Ostrohradskoho, 2012. 112 s.

Надійшла до редакції 8 травня 2023 р.