

АВТОМАТИЗАЦІЯ І КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

УДК 519.876.5

DOI: 10.31471/1993-9981-2019-1(42)-97-103

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ ОЦІНКИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ТРУБОПРОВІДІВ ТА СТАНУ ДОВКІЛЛЯ

А. П. Олійник¹, Г. В. Григорчук¹, Р. М. Говдяк²

¹Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,
вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, 76019, andrii_oliinyk@gmail.com, tel.+380342723824

²Товариство з обмеженою відповідальністю "Інжинірингова компанія Машекспорт",
Кудрявський узвіз, 7, м. Київ, Україна, 04655, natsexpert.g@gmail.com, +380672099222

В контексті забезпечення безаварійної роботи нафтогазопроводів та попередження можливих негативних впливів на довкілля розглянуто питання побудови комплексної математичної моделі для оцінки технічного стану трубопроводів та впливу аварійних ситуацій на стан довкілля при витоку вуглеводнів. Приведено модель оцінки напружено-деформованого стану трубопроводу за даними про переміщення точок поверхні для надземних та підземних ділянок шляхом побудови закону руху ділянки за відомими переміщеннями певної множини точок поверхні з використанням допущень про тип деформацій перерізів та відтворення компонент тензорів деформацій та напружень на основі різних моделей деформованого твердого тіла. Вказана модель не вимагає інформації про весь комплекс сил та навантажень, що діють на досліджуваний об'єкт в процесі експлуатації. Уточнена модель течії в трубопроводі з порушенням його герметичності шляхом запису спеціального типу граничних умов для системи рівнянь Нав'є-Стокса в двовимірній постановці та розробки оригінального методу її розв'язання на основі методу кінцевих різниць.

В статті наведено умови стійкості запропонованих чисельних схем на основі спектральної ознаки стійкості. З метою оцінки можливих негативних впливів на довкілля розроблено модель поширення речовини при її витоку з трубопроводу шляхом розв'язування двовимірних рівнянь дифузії з урахуванням змінних властивостей та різних типів граничних умов, які враховують кількість джерел забруднення та їх інтенсивність. Наведено результати розрахунків за обчислювальними алгоритмами, які реалізують вказані моделі та графічний матеріал, який ілюструє ці розрахунки, проаналізовано особливості поширення шкідливих речовин в середовищі поблизу трубопроводу. Встановлено напрямки подальших досліджень для успішної практичної реалізації запропонованих моделей.

Ключові слова: трубопровід, напружено-деформований стан, течія з витоками, дифузія, поширення шкідливих речовин.

В контексте обеспечения безаварийной работы нефтегазопроводов и предупреждения возможных негативных воздействий на окружающую среду рассмотрен вопрос построения комплексной математической модели для оценки технического состояния трубопроводов и влияния аварийных ситуаций на состояние окружающей среды при утечке углеводородов. Приведены модель оценки напряженно-деформированного состояния трубопровода по данным о перемещении точек поверхности для надземных и подземных участков путем построения закона движения участка по известным перемещениям определенного множества точек поверхности с использованием допущений о типе деформаций сечений и воспроизведения компонент тензоров деформаций и напряжений на основе различных моделей деформированного твердого тела. Указанная модель не требует информации о всем комплексе сил и нагрузок, действующих на исследуемый объект в процессе эксплуатации. Уточненная модель течения в трубопроводе с нарушением его герметичности путем записи специального типа граничных условий для системы уравнений Навье-Стокса в двумерной постановке и разработки оригинального метода ее решения на основе метода конечных разностей.

В статье приведены условия устойчивости предлагаемых многочисленных схем на основе спектральной признаки устойчивости. С целью оценки возможных негативных воздействий на окружающую среду

розроблена модель розповсюдження речовини при її утечці з трубопроводу шляхом рішення двовимірних рівнянь дифузії з урахуванням змінних властивостей і різних типів граничних умов, що враховують кількість джерел забруднення і їх інтенсивність. Приведені результати розрахунків по висувальними алгоритмами, які реалізують вказані моделі і графічний матеріал, ілюструючий ці розрахунки, проаналізовані особливості розповсюдження шкідливих речовин в середовищі поблизу трубопроводу. Встановлено напрямки подальших досліджень для успішної практичної реалізації запропонованих моделей.

Ключові слова: трубопровід, напружено-деформоване стан, течія з утечками, дифузія, розповсюдження шкідливих речовин.

In the context of providing trouble-free operation of oil and gas pipelines and preventing possible negative impacts on the environment, the issues of constructing an integrated mathematical model for assessing the technical condition of pipelines and the impact of emergency situations on the state of the environment in the course of hydrocarbon leakage are considered. The model of the evaluation of the stress-strain state of the pipeline according to the data on the displacement of surface points for the above ground and underground sections is given by constructing the law of motion of the site by known displacements of a certain set of surface points using assumptions about the type of deformation of the sections and reproduction of the deformations and stresses tensors components on the basis of different models of deformed solid body.

The specified model does not require information on the whole complex of forces and loads acting on the investigated object during operation. The flow model has been refined in a pipeline with a violation of its tightness by recording a special type of boundary conditions for a Navier-Stokes equation system in a two-dimensional formulation and developing an original method for its solution on the basis of the finite difference method. In the article the stability conditions of the proposed numerical schemes on basis of the spectral sign of stability are presented. In order to assess possible negative impacts on the environment, a model of propagation of matter at its leakage from the pipeline was developed by solving two-dimensional diffusion equations taking into account the variables and different types of boundary conditions that take into account the number of sources of pollution and their intensity. The results of computations based on computational algorithms implemented by these models and graphic material illustrating these calculations are presented, peculiarities of distribution of harmful substances in the environment near the pipeline are analyzed. Directions of further researches for successful practical realization of the offered models are established.

Keywords: pipeline, stress-deformed state, current with leakage, diffusion, distribution of harmful substances.

Вступ.

Проблеми оцінки реального технічного стану трубопроводів та їх впливу на довкілля при виникненні аварійних ситуацій досліджувалось багатьма авторами [1-3], проте ускладнення ситуації в країні вимагає розробки екологічних методів, які б дозволяли визначати реальний технічний стан об'єкта, передбачати як виникнення аварійних ситуацій через різні причини (зношення обладнання через тривалий час експлуатації, зміна умов експлуатації, можливі диверсії тощо), так і можливі наслідки таких ситуацій. При цьому значної ваги набувають методи математичного моделювання, які дозволяють на підставі обмеженої інформації робити висновки про реальний технічний стан об'єктів, прогнозувати можливі інциденти на об'єктах та проводити оцінку її наслідків. Актуальність таких досліджень підтверджується аварійними ситуаціями, які все

частіше виникають на трубопроводах різного призначення – наприклад, інцидент в м. Калуш, січень 2019 року, прориви трубопроводів в м. Київ весною 2017 р., аварії на трубопроводах в Закарпатській області в 2015 р. тощо.

Математичні моделі процесів

Проблема, що вирішується може бути розділена на три основні задачі:

1. Визначення параметрів напружено-деформованого стану досліджуваних об'єктів за відомою інформацією про зміну їх просторової конфігурації – як правило, такою інформацією є дані про переміщення точок поверхні досліджуваного тіла, на основі якої вдається побудувати математичне подання [3] радіус-вектор будь якої точки цього тіла в контрольні моменти часу. Для об'єктів, що мають циліндричну форму (трубопроводи різного призначення, свердловини з газорідними

потоками тощо), вказане подання може бути записане у вигляді:

$$\vec{r}(s, \varphi, r, t) = \vec{r}_l(s, \varphi, r, t) + \rho(s, \varphi, r, t)(\cos \omega(s, \varphi, r, t)\vec{b}_l + \sin \omega(s, \varphi, r, t)\vec{n}_l) + \psi(s, \varphi, r, t)\vec{c}_l - \frac{D}{2}\vec{n}_l \quad (1)$$

де s, φ, r, t – пов’язані з криволінійним циліндричним тілом координати відповідно вздовж осі тіла $0 < s < L$, по полярному куту $0 \leq \varphi \leq 2\pi$ та по радіусу об’єкта $R_{\text{внут}} < r < R_{\text{зовн}}$, L – довжина досліджуваного об’єкта; \vec{r}_l – радіус вектор точки на твірній об’єкта; D – його діаметр; $\rho(s, \varphi, r, t); \omega(s, \varphi, r, t); \psi(s, \varphi, r, t)$ – функції, що характеризують переміщення точок досліджуваного тіла відповідно в радіальному,

полярному та повздовжньому напрямках, $\vec{c}_l, \vec{b}_l, \vec{n}_l$ – вектори дотичної, бінормалі та нормалі до твірної об’єкта. Задання функції $\rho(s, \varphi, r, t); \omega(s, \varphi, r, t)$ та $\psi(s, \varphi, r, t)$ на основі даних про переміщення точок поверхні дозволяє в контрольний момент часу провести розрахунки компонент тензорів деформацій ε_j^i [4]:

$$\varepsilon_{ij}(s, \varphi, r, t_k) = \frac{1}{2}(g_{ij}(s, \varphi, r, t_k) - g_{ij}(s, \varphi, r, t_0)), \quad (2)$$

де g_{ij} – компоненти матричного тензора, побудовані за (1) [4], а також компоненти тензора напружень – у випадку, коли деформації

вважаються пружними, перерахунок вказаних компонент проводиться за законом Гука:

$$\sigma_{ij} = \lambda I_1(\varepsilon)g_{ij}(s, \varphi, r, t_0) + 2\mu\varepsilon_{ij}(s, \varphi, r, t), \quad (3)$$

де $I_1(\varepsilon) = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \varepsilon_{ij}(s, \varphi, r, t)g^{ij}(s, \varphi, r, t_0)$ – перший інваріант тензора деформацій; λ, μ – параметри Ламе матеріалу [5], які пов’язані з модулем Юнга E та коефіцієнтом Пуассона σ матеріалу співвідношеннями:

$$\mu = \frac{E}{2(\sigma + 1)}; \lambda = \frac{E\sigma}{(1 + \sigma)(1 - 2\sigma)}; \quad (4)$$

- для анізотропної моделі використання співвідношень (3) та (4) замінюється формулою:

$$\sigma_{ij}(s, \varphi, r, t) = \sum_{k,l=1}^3 C_{ijkl}\varepsilon_{kl}(s, \varphi, r, t), \quad (5)$$

де C_{ijkl} – компоненти тензорів пружних модулів матеріалу.

Наведена методика детально наведена та обґрунтована в [3,5], її особливістю є те, що висновок про напружено-деформований стан об’єкта робиться на основі певних інтегральних показників – переміщень точок поверхні тіла без деталізації причин виникнення цих переміщень. На основі даних про зміну напружено-деформованого стану об’єкта вдається вислідити його потенційно небезпечні ділянки,

на яких напруження приймають критичний рівень, або ж зміна напружень є такою, що може призвести до розгерметизації об’єкта, а також, і до потенційно небезпечних екологічних впливів. Проведені в останні роки дослідження [9] дозволяють узагальнити результати [3] на випадок підземних трубопроводів, що дозволяє прогнозувати небезпечні з точки зору розгерметизації зони підземних трубопроводів за інформацією про просторову конфігурацію осі магістрального трубопроводу.

2. Оцінка інтенсивності витoku речовини при порушенні герметичності об’єкта.

Задача оцінки параметрів течії у трубопроводах зводиться до необхідності розв’язання системи рівнянь Нав’є-Стокса [6] в двовимірній постановці:

$$\begin{cases} u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + g_x \\ u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + g_y \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \end{cases}, \quad (6)$$

з умовами: $p=p_0-kx$; k - коефіцієнт перепаду тиску; з граничними умовами виду

$$\left\{ \begin{array}{l} u|_{x=0} = -\frac{ky^2}{4\mu} + \frac{kRy}{2\mu}, \\ u|_{y=0} = u|_{y=2R} = 0, \\ v|_{x=0} = v|_{y=0} = 0, \\ v|_{y=2R} = \begin{cases} 0, & x \leq x_1, x \geq x_2 \\ \pm V_{\text{ВИТ}}, & x \in [x_1, x_2] \end{cases} \end{array} \right. \quad (7)$$

Граничні умови виду (7) дозволяють враховувати як можливі витoki, так і втоки рідини.

Розроблено чисельний метод розв'язання системи (6); (7), доведено його збіжність і стійкість, побудовано та реалізовано розрахунковий алгоритм, виявлено оптимальні параметри розрахункової сітки. Це дозволяє

моделювати поля швидкостей при заданій величині $V_{\text{внут}}$, що не завжди можна визначити практично. Тому для розв'язання системи (6) застосовується методика [6], яка дозволяє звести систему (6) до рівняння Пуассона:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} = 2\rho \left(\frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial x} \right). \quad (8)$$

Існують методики розв'язання системи (6), проте, використовуючи результати [7], можна зробити висновок, що

$$\left| 2\rho \left(\frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right| \ll 1, \quad (9)$$

і, з урахуванням (9), можна запропонувати наступний алгоритм розв'язання:

2.1 На першому кроці розв'язується рівняння (8) з граничними умовами:

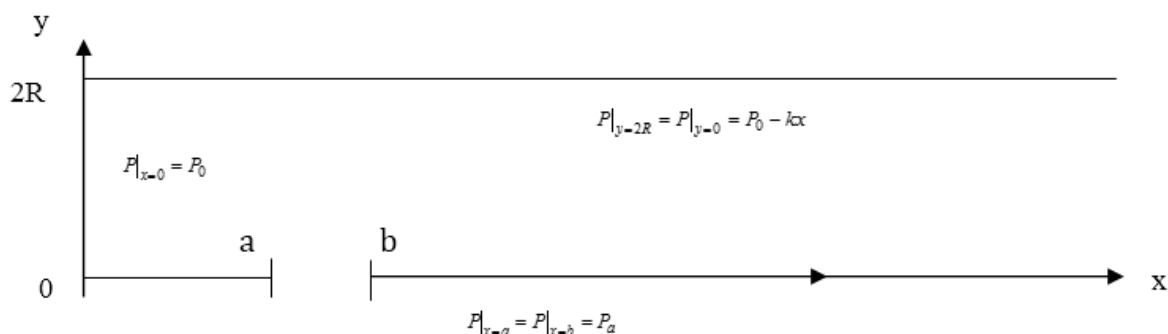


Рисунок 1 – Граничні умови для рівняння Лапласа (Задача Діріхле).

При цьому використовується метод поверхневої релаксації [6].

2.2 Розв'язується система (6) з умовам (7), причому $V_{\text{внут}}$ визначається за знайденими $P(x,y,t)$ за законом Дарсі:

$$\left\{ \begin{array}{l} u = -\frac{k}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \\ v = -\frac{k}{\mu} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{kg\rho}{\mu} \end{array} \right. \quad (10)$$

k - проникність середовища, μ -динамічна в'язкість рідини; коли умова $v \gg v^2$ не виконується, використовується закон Форхгеймера [6]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \\ -\frac{\partial p}{\partial x} - \frac{\mu}{k} u - \beta \frac{\rho V^2}{v_k} \frac{u}{v} = 0 \\ -\frac{\partial p}{\partial y} + \rho g - \frac{\mu}{k} v - \beta \frac{\rho V^2}{\sqrt{k}} \frac{v}{v} = 0 \end{array} \right. \quad (11)$$

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.

2.3 За знайденим розподілом швидкостей рівняння (8) розв'язується з заново перерахованою правою частиною. Процедура

повторюється до тих пір, доки розв'язок не збіжиться.

Особливістю одержаного розв'язку є те, що граничні умови (7) змінюються на кожному кроці ітераційної процедури, таким чином, у випадку збіжності ітераційного процесу, вдасться визначити швидкість витікання рідин з досліджуваного об'єкта.

3. Визначення концентрації шкідливих речовин в зоні аварійної ситуації.

Для оцінки концентрації шкідливих речовин розв'язується рівняння дифузії, яке для двовимірної області записується у вигляді:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (a(x, y, t) \frac{\partial C}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (a(x, y, t) \frac{\partial C}{\partial y}). \quad (12)$$

Коефіцієнт $a(x, y, t)$ є коефіцієнтом дифузії, який залежить від просторових координат x, y та часу t . Рівняння (12) доповнюється граничними та початковими умовами [8]:

$$C_0(x, y) = C_0(x, y, 0), \quad (13)$$

$$\begin{cases} \frac{2(\tilde{c}_{k,m} - c_{k,m}^n)}{\tau} = a^2 \frac{\tilde{c}_{k+1,m} - 2\tilde{c}_{k,m} + \tilde{c}_{k-1,m}}{h_x^2} + a^2 \frac{c_{k+1,m}^n - 2c_{k,m}^n + c_{k-1,m}^n}{h_y^2} + f_{k,m}^n \\ \frac{2(c_{k,m}^{n+1} - \tilde{c}_{k,m})}{\tau} = a^2 \frac{\tilde{c}_{k+1,m} - 2\tilde{c}_{k,m} + \tilde{c}_{k-1,m}}{h_x^2} + a^2 \frac{c_{k+1,m}^{n+1} - 2c_{k,m}^{n+1} + c_{k-1,m}^{n+1}}{h_y^2} + f_{k,m}^n \end{cases} \quad (15)$$

Різницева схема в першій групі рівнянь (15) є явною за координатою y , а в другій групі - явною за координатою x . При цьому на кінцевому кроці розрахункової процедури вирішується система лінійних алгебраїчних рівнянь з тридіагональною матрицею. При дослідженні стійкості різницевої схем використовується спектральна ознака стійкості [6]

Результати розрахунків

Розроблені математичні моделі реалізовано у вигляді обчислювальних алгоритмів. На рис.2 зображено потенційно небезпечні ділянки досліджуваного об'єкта (трубопроводу, обв'язки свердловини) з точки зору зміни напружено-деформованого стану та можливого порушення герметичності. Це дозволяє оцінити геометричне розташування можливих дефектів та їх інтенсивність, яку характеризує ширина зони практичних напружень.

$$\begin{cases} C|_{x=0} = C_1(y, t) \\ C|_{x=L_1} = C_2(y, t) \\ C|_{y=0} = C_3(x, t) \\ C|_{y=L_2} = C_4(x, t) \end{cases} \quad (14)$$

При визначенні аналітичної структури $C_i(x, t); C_j(y, t), j=1,2$ використовуються результати розрахунків п.п.1.2 в допущенні про пропорційність концентрації речовини на границі області швидкості витікання речовини.

При чисельному розв'язанні рівнянь (12) з початковими умовами (13) та граничними (14) використовують метод змінних напрямків [6], який дозволяє для вказаних рівнянь (наприклад для рівняння (12) в допущенні про сталість коефіцієнтів $a(x, y, t)$) записати систему різницевої рівнянь:

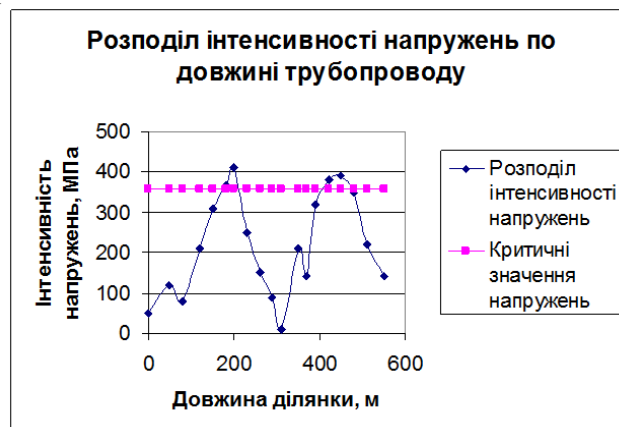


Рисунок 2 - Розподіл інтенсивності напружень по довжині підземної ділянки трубопроводу.

На рис.3 наведено розподіл тиску в трубопроводній системі при порушенні її герметичності в залежності від величини зони прориву. Вказана картина спостерігається при порушенні герметичності підземної ділянки при

надземному прориві через значний градієнт тиску аварійна ситуація розвивається з катастрофічною швидкістю.

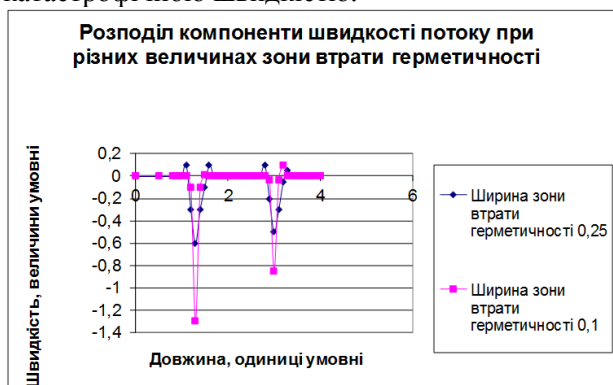


Рисунок 3 - Розподіл компоненти швидкості потоку при різних величинах зони втрати герметичності.

На рис.4 наведено розподіл концентрації шкідливої речовини в зоні порушення герметичності об'єкта при одному порушенні герметичності:

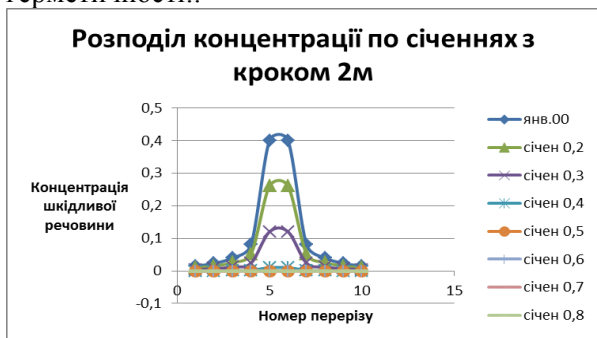


Рисунок 4 – Розподіл концентрації шкідливих речовин в зоні порушення герметичності об'єкта.

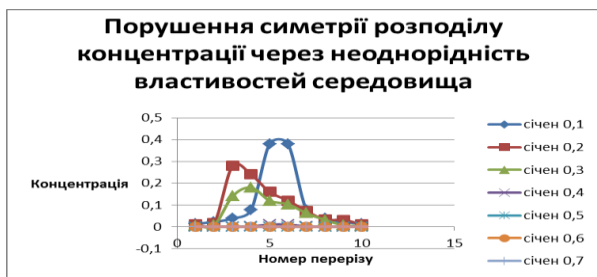


Рисунок 5 – Розподіл концентрації шкідливих речовин в зоні порушення герметичності об'єкта при неоднорідних властивостях середовища.

На рис. 4 і 5 показано, що розподіл концентрації шкідливої речовини суттєво залежить від властивостей середовища, в яке вона проникає – при виконанні умови $a(x,y,t)=const$ розподіл концентрацій є симетричним (рис.4), якщо ж ця умова не виконується – симетрія розподілу втрачається (рис. 5.).

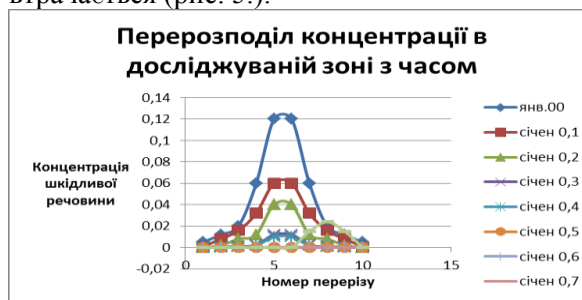


Рисунок 6 – Перерозподіл концентрації шкідливих речовин в зоні порушення герметичності об'єкта з часом.

На рис. 6 показано тенденцію зміни концентрації шкідливої речовини з часом при однорідних властивостях середовища, в яке вона витікає – максимальні значення зменшуються, а зона забруднення розширюється (це помітно при порівнянні конфігурацій, пр. ивдєні на рис. 4 і 6).

Висновки

В ході проведених досліджень одержано наступні результати:

1. Розроблено методику виявлення потенційно небезпечних ділянок з точки зору зміни напружено-деформованого стану та можливої втрати геометричності об'єктів за відомими переміщеннями певної множини точок поверхні, яка дозволяє досліджувати як надземні, так і підземні ділянки трубопроводів, а також підземні свердловинні колони труб.

2. Задаючи функції $\rho(s, \varphi, r, t)$; $\omega(s, \varphi, r, t)$; $\psi(s, \varphi, r, t)$ можна моделювати напружено-деформований стан трубопроводних систем з криволінійною конфігурацією осі та з деформованими перерізами.

3. Розроблено математичну модель течії в'язкої рідини в трубопроводній системі за наявності витоків або втікання рідини через поверхню на основі чисельного інтегрування системи рівнянь Нав'є-Стокса. Встановлено спосіб визначення швидкості витoku рідини при

втраті герметичності в залежності від величини зони витoku.

4. Розроблено математичну модель процесу дифузії шкідливих речовин у формі (12)-(14), проведено відповідні розрахунки для різних типів граничних та початкових умов та для середовища поширення шкідливих з різними властивостями. Всі розроблені моделі доведені до чисельної реалізації.

Напрями подальших досліджень можуть бути пов'язані з розробкою методики визначення величини $a(x,y,t)$ та їх розподілу в просторі, що суттєво полегшує задачу оцінки зони шкідливих впливів.

Література

1. Неразрушающий контроль и диагностика. Справочник/ В.В. Ключев, Р.Ф. Соснин и др. – 2-е изд. – М.: Машиностроение, 2003 – 656 с.
2. Мазур И.И. Безопасность трубопроводных систем/ И.И. Мазур, О.М. Иванцов – М.:ИЦ «Елима», 2004 – 1104 с.
3. Олійник А.П. Математичні моделі процесу квазістаціонарного деформування трубопроводних та промислових систем при зміні їх просторової конфігурації: Наукове видання / А.П. Олійник – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2010 – 320с.
4. Седов Л.И. Механика сплошных сред /Л.И. Седов – М.: Наука, 1984 – 572с.
5. Заміховський Л.М. Математичний апарат для контролю напружено-деформованого стану трубопроводів при зміні їх просторового положення / Л.М. Заміховський, А.П. Олійник .- Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2008 – 306 с.
6. Андерсон Д. Вычислительная гидромеханика и теплообмен / Д. Андерсон, Дж. Теннехилл, Р. Плетчер – в 2-х томах, перевод с англ. – М.: Мир, 1990 – 776 с.
7. Modelling of fluid flow in pipeline with the leaks due to surface/ A.P. Olijnyk, L.O. Shtayer / - Journal of Hydrocarbon Power Engineering, 2014, Vol 1, Issue 1 – pp. 45-52.
8. Олійник А.П. Математичне моделювання процесів забруднення ґрунтів як результату технологічних процесів - / А.П. Олійник, А.А. Мороз – Матеріали МНТК «Фундаментальні та

прикладні проблеми сучасних технологій» - Тернопіль, 2015 – ст.22-24

9. Олійник А.П. Розроблення методики оцінки напружено – деформованого стану лінійних ділянок магістральних трубопроводів. Л.Я.Жовтуля, А.П.Олійник, А.В.Яворський, М.О.Карпаш - Методи та прилади контролю якості”, №1(38), 2017, ст.57 -63.

References

1. Nerazrushayushij kontrol i diagnostika. Spravochnik/ V.V. Klyuev, R.F. Sosnin i dr. – 2-e izd. – М.: Mashinostroenie, 2003 – 656 s.
2. Mazur I.I. Bezopasnost truboprovodnyh sistem/ I.I. Mazur, O.M. Ivancov – М.:IC «Elima», 2004 – 1104 s.
3. Olijnik A.P. Matematichni modeli procesu kvazistacionarnogo deformuvannya truboprovodnih ta promislovih sistem pri zmini yih prostоровoyi konfiguraciji: Naukove vidannya / A.P. Olijnik – Ivano-Frankivsk: IFNTUNG, 2010 – 320s.
4. Sedov L.I. Mehanika sploshnyh sred /L.I. Sedov – М.: Nauka, 1984 – 572s.
5. Zamihovskij L.M. Matematichnij aparat dlya kontrolyu napruzhenno-deformovanogo stanu truboprovodiv pri zmini yih prostоровogo polozhennya / L.M. Zamihovskij, A.P. Olijnik .- Ivano-Frankivsk: IFNTUNG, 2008 – 306 s.
6. Anderson D. Vychislitel'naya gidromehaniка i teploobmen / D. Anderson, Dzh. Tennehill, R. Pletcher – v 2-h tomah, perevod s angl. – М.: Mir, 1990 – 776 s.
7. Modelling of fluid flow in pipeline with the leaks due to surface/ A.P. Olijnyk, L.O. Shtayer / - Journal of Hydrocarbon Power Engineering, 2014, Vol 1, Issue 1 – pp. 45-52.
8. Olijnik A.P. Matematichne modelyuvannya procesiv zabrudnennya gruntiv yak rezultatu tehnologichnih procesiv - / A.P. Olijnik, A.A. Moroz – Materiali MNTK «Fundamentalni ta prikladni problemi suchasniх tehnologij» - Ternopil, 2015 – st.22-24
9. Olijnik A. P. Rozroblennya metodiki ocinki napruzhenno – deformovanogo stanu liniynih dilyanok magistralnih truboprovodiv. L.Ya.Zhovtulya, AP.Olijnik, A.V.Yavorskij, M.O.Karpash - Metodi ta priladi kontrolyu yakosti”, №1(38), 2017, st.57 -63.