

МЕТОДИ І ПРИЛАДИ ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТИ РІДКОЇ І ГАЗОПОДІБНОЇ ФАЗ

УДК 622.692.4:539.4

DOI: 10.31471/1993-9981-2023-1(50)-41-47

ОЦІНКА ІНТЕНСИВНОСТІ ВИТОКУ РЕЧОВИНИ ПРИ ПОРУШЕННІ ГЕРМЕТИЧНОСТІ ОБ'ЄКТА

А. П. Олійник, О. М. Туць

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ, 76019
вул. Карпатська, 15. E-mail: andrioliiny@gmail.com*

Статтю присвячено дослідженню технічного стану трубопроводів, якими транспортуються газорідні суміші з агресивними компонентами, що є важливою науково-технічною проблемою. Реалізовано математичну модель процесу витікання продукту, що транспортується, внаслідок втрати герметичності труби на основі системи рівнянь Нав'є-Стокса з граничними умовами, які враховують геометрію зон витікання та величину швидкості витікання. За створеними на основі вказаних моделей обчислювальними алгоритмами проведено розрахунки. Наведено аналіз результатів розрахунків – швидкості витікання в залежності від динамічної в'язкості суміші. Проаналізовано вплив на параметри течії – витрати суміші та сили гідравлічного опору – зміни динамічної в'язкості суміші. При цьому використовувались результати моделювання течії Пуазейля. На основі аналізу поведінки перепаду тиску в зоні аварійного викиду забруднюючих речовин одержано формулу для експрес-оцінки величини зони проникнення з урахуванням властивостей ґрунту та швидкості перекриття аварійної ділянки. Наведено висновки за результатами досліджень. При розробці практичних методик для розрахунку течії в газорідних свердловинних потоках необхідно дослідити вплив на його точність параметрів різницевої схеми, а саме кроків по поздовжній та поперечній координатах, а також провести дослідження поведінки розв'язків при різних значеннях числових характеристик процесу, наведених в п.2, що дозволить визначити область практичного застосування запропонованої моделі з огляду на геометричні розміри об'єктів, тип рідин, що протікають по системі, а також скоротити час розрахунку одного з варіантів задачі, що є особливо важливим при оптимізації моделі за критерієм її найкращої відповідності реальній фізичній картині процесу. Важливим питанням залишається встановлення меж застосування запропонованої двовимірної моделі для опису суттєво тривимірних реальних досліджуваних систем.

Ключові слова: напружений стан, трубопровід, течія в'язкої рідини, динамічна в'язкість, рівняння Нав'є-Стокса, газова суміш.

The article is devoted to the study of the technical condition of pipelines through which gas-liquid mixtures with aggressive components are transported, which is an important scientific and technical problem. A mathematical model of the process of leakage of the transported product due to loss of pipe tightness based on the system of Navier-Stokes equations with boundary conditions has been implemented and take into account the geometry of the leakage zones and the magnitude of the leakage velocity. Calculations were made according to computational algorithms created on the basis of the specified models. An analysis of the results of the calculations is presented - the flow rate depending on the dynamic viscosity of the mixture. The influence on the flow parameters – mixture consumption and hydraulic resistance forces – changes in the dynamic viscosity of the mixture was analyzed. At the same time, the results of modeling the Poiseuille flow were used. Based on the analysis of the behavior of the pressure drop in the zone of emergency release of pollutants, a formula was obtained for the express estimation of the size of the penetration zone, taking into account the properties of the soil and the speed of overlapping of the emergency area. Conclusions based on research results are presented. When developing practical methods for calculating flow in gas-liquid well flows, it is necessary to conduct a study of the influence of the parameters of the difference scheme on its accuracy namely steps along the longitudinal and transverse coordinates, as well as to conduct a study of the behavior of the solutions at different values of the numerical characteristics of the process given in corresponding clause, which will allow to determine the area of practical application of the proposed model from the point of view of the geometric dimension s of the objects, the type of fluids flowing through the system, as well as to reduce the calculation time of one of the variants of the problem, which is especially important when optimizing presented model according to the

criterion of its best correspondence to the real physical picture of the process. An important issue remains the establishment of limits of application of the proposed two-dimensional model for the description of essentially three-dimensional real systems under study.

Key words: stress state, pipeline, viscous fluid flow, dynamic viscosity, Navier-Stokes equation, gas mixture.

Вступ. Дослідження технічного стану трубопроводів, якими транспортуються газорідинні суміші з агресивними компонентами є важливою науково-технічною проблемою, вирішення якої дозволяє проводити ідентифікацію потенційно небезпечних ділянок. Зокрема, вивчення напружено-деформованого стану дозволяє виявити ті зони, в яких можлива втрата суцільності матеріалу трубопроводу, і, як наслідок, викиди транспортованих хімічно агресивних речовин. При цьому необхідно враховувати весь комплекс факторів силового впливу, що діють на трубопровід.

Мета роботи - дослідити зміну характеристик потоку в трубопроводі при зміні складу суміші, яка транспортується, шляхом вивчення впливу зміни динамічної в'язкості багатокомпонентної газової суміші.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень і публікацій. Вказана проблема досліджувалась багатьма авторами [1,2, 5, 6. 7.9. 12], проте в цих роботах приймається та чи інша модель процесу деформування та напруженого стану без урахування особливостей продукту, що транспортується.

Висвітлення невирішених раніше частин загальної проблеми. При вивченні технічного стану трубопроводів, якими транспортуються газорідинні суміші з агресивними компонентами, необхідно враховувати реальну просторову конфігурацію реальних трубопровідних систем як в надземному [1], так і в підземному положенні [7]. При цьому для надземних ділянок можна використовувати інтегральний підхід [1] до оцінювання напруженого стану, а також вивчати окремі

види силових впливів більш детально (наприклад, вітрові навантаження).

Формулювання цілей статті. Для вирішення мети дослідження необхідно виконати такі завдання:

- удосконалити методику розрахунку швидкості витoku суміші при втраті герметичності внаслідок виникнення критичних напружень в матеріалі труби;

- вивчити вплив зміни динамічної в'язкості, щоб дослідити зміну характеристик потоку в трубопроводі при зміні складу суміші, яка транспортується;

- здійснити порівняльний аналіз величини вказаної швидкості в залежності від динамічної в'язкості багатокомпонентної газової суміші;

- оцінити розмір зони проникнення забруднюючої речовини внаслідок аварії.

При розв'язанні поставлених задач застосовувалися методи описовий, аналітичний, чисельний, математичного моделювання.

Висвітлення основного матеріалу дослідження. Задача оцінки параметрів течії у трубопроводах та в свердловинних потоках зводиться до необхідності розв'язання системи рівнянь Нав'є-Стокса [5] в двовимірній постановці [9,12]:

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

з умовами: $p = p_0 - kx$; k – коефіцієнт перепаду тиску. Саме ця величина визначає швидкість і об'єм забруднюючих речовин. Якісно ця залежність буде описана нижче.

$$u|_{x=0} = -\frac{ky^2}{4\mu} + \frac{kRy}{2\mu},$$

$$u|_{y=0} = u|_{y=2R} = 0 \quad (2)$$

$$v|_{x=0} = v|_{y=0} = 0$$

$$v|_{y=2R} = \begin{cases} 0, & x \leq x_1; x \geq x_2 \\ \pm v_{\text{вумп}}, & x \in [x_1, x_2] \end{cases}$$

Розроблено чисельний метод розв'язання системи (1), (2), доведено його збіжність і стійкість, побудовано та реалізовано розрахунковий алгоритм, виявлено оптимальні параметри розрахункової сітки. Це дозволяє

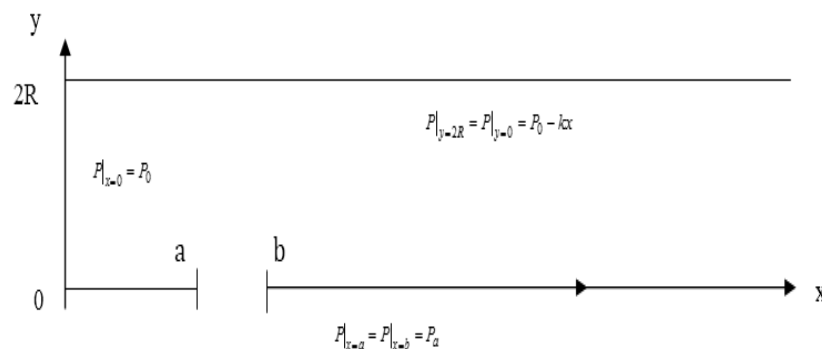


Рисунок 1 – Граничні умови для рівняння Лапласа (Задача Діріхле)

При цьому використовується метод верхньої релаксації [9]

Далі розв'язується система (1) з умовам (2), причому $v_{\text{вумп}}$ визначається за знайденими $P(x, y, t)$ за законом Дарсі:

$$\begin{cases} u = -\frac{k}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \\ v = -\frac{k}{\mu} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{kg\rho}{\mu} \end{cases} \quad (5)$$

моделювати поля швидкостей при заданій величині $v_{\text{вумп}}$, що не завжди можна визначити практично. Тому для розв'язання системи (1) застосовується методика [5,6,9], яка дозволяє звести систему до рівняння Пуассона:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} = 2\rho \left(\frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial x} \right). \quad (3)$$

Існують методики розв'язання системи (6), проте, використовуючи результати[9], можна зробити висновок, що

$$\left| 2\rho \left(\frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right| \ll 1, \quad (4)$$

і, з урахуванням (10), можна запропонувати наступний алгоритм розв'язання:

На першому кроці розв'язується рівняння (2) з граничними умовами (рис.1):

K – проникність середовища; μ – динамічна в'язкість рідини.

За знайденим розподілом швидкостей рівняння (4) 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 (3) змінюються на кожному кроці ітераційної процедури, таким чином, у випадку збіжності ітераційного процесу, вдається визначити швидкість витікання рідин з досліджуваного об'єкта.

Дослідження технічного стану трубопроводів, якими транспортуються газорідні суміші з агресивними компонентами передбачає вивчення властивостей цих сумішей. При вивченні течії в трубі циліндричного перерізу в'язкої рідини (газу) (радіус труби a , в'язкість μ , перепад тиску i) відомими є результатами [6] є течія Пуазейля, згідно з якими швидкість визначається за формулою:

$$\omega = \frac{i}{4\mu}(a^2 - r^2). \quad (5)$$

Профіль швидкості (5) в поперечному перерізі круглої труби є параболоїдом обертання, максимальна швидкість якого:

$$\omega_{\max} = \frac{ia^2}{4\mu}. \quad (6)$$

Об'ємна витрата складає:

$$Q = \int_0^a \omega \cdot 2\pi r dr = \frac{i\pi a^4}{8\mu}. \quad (7)$$

При транспортуванні газових сумішей з агресивними компонентами необхідно визначити реальне значення динамічної в'язкості:

$$\mu = \sum_{i=1}^n \sigma_i \mu_i, \quad (8)$$

де σ_i - масова частка i -ого компоненти, μ_i - його динамічна в'язкість. Коефіцієнт тертя C_f - це відношення сили опору

$$R = 2\pi a l \cdot \frac{ia}{2} = \pi a^2 l i, \quad (9)$$

до швидкості напору $\frac{\rho \omega_{\text{сеп}}^2}{2}$ і до деякої характерної площі s :

$$C_f = \frac{R}{\frac{\rho \omega_{\text{сеп}}^2}{2} s} = \frac{16}{\text{Re}}, \quad (10)$$

де Re - число Рейнольдса: $\text{Re} = \frac{d\omega_{\text{сеп}}}{\mu}$, де $\frac{\mu}{\rho}$

d - діаметр труби; $d = 2a$; μ та ρ - відповідно динамічна в'язкість та густина суміші. Для двокомпонентної суміші:

$$\mu = (1 - c_1)\mu_1 + c_1\mu_2, \quad (11)$$

де μ_1 - в'язкість основного компонента суміші, μ_2 - в'язкість додаткового компонента, $0 \leq c_1 \leq 1$. При цьому зміна швидкості становитиме:

$$\omega_1 - \omega_2 = \frac{i}{4\mu_1}(a^2 - r^2) - \frac{i}{c_1\mu_2 + (1 - c_1)\mu_1}(a^2 - r^2) = \frac{i(a^2 - r^2)}{4} \left[\frac{1}{\mu_1} - \frac{1}{c_1\mu_2 + (1 - c_1)\mu_1} \right], \quad (12)$$

зміна витрати

$$Q_1 - Q_2 = \frac{i\pi a^4}{8} \left[\frac{1}{\mu_1} - \frac{1}{c_1\mu_2 + (1 - c_1)\mu_1} \right]. \quad (13)$$

Знаючи вказані величини в абсолютних одиницях, можна оцінити, як необхідно змінити величини i перепадів тиску для забезпечення сталого, незмінного рівня витрати Q . Очевидно, що при реалізації моделі, яка передбачає розв'язання (1), (2), (5) необхідно враховувати склад вказаних сумішей шляхом використання залежності (11). Розроблена модель дозволяє вивчати технічний стан трубопроводів, якими транспортуються газорідні суміші з агресивними компонентами, і, зокрема, широкий клас двокомпонентних сумішей – наприклад, воднево-метанові суміші. На рис. 2 наведено графік розподілу компоненти швидкості витікання суміші з трубопроводу при втраті герметичності при різних значеннях динамічної в'язкості (ряд 1 - μ_1 ряд 2 - μ_2 , $\mu_1 < \mu_2$)



Рисунок 2 – Розподіл компоненти швидкості потоку за різних значень динамічної в'язкості (ряд1 - μ_1 , ряд 2 - μ_2 , $\mu_1 < \mu_2$)

Нехай відомим є місце втрати суцільності труби (рис. 3). При цьому поширення шкідливих речовин може мати таку картину.

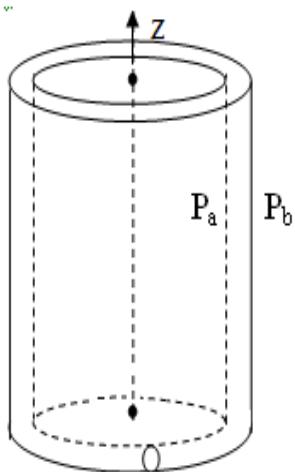


Рисунок 3 – Фрагмент труби

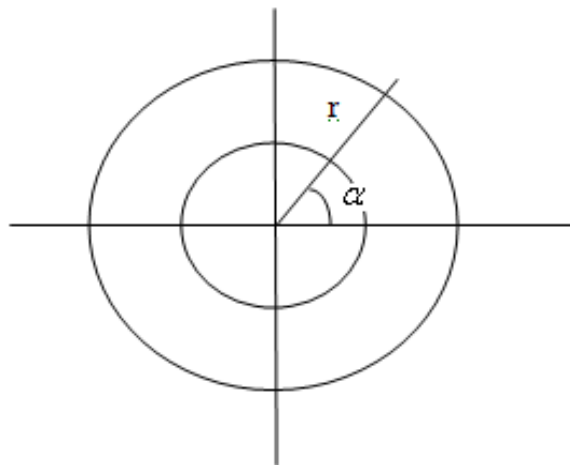


Рисунок 4 – Вибір координат в перерізі (верхня поверхня труби $\alpha=90$)

Викид відбувається у напрямі перпендикулярно осі труби (рис. 4), 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. Оцінка параметрів витoku речовин проводиться за формулами (6)-(13).

При умові $\alpha < 1$ реалізується стандартна модель дифузії (5);

$$- 0 \leq \alpha < 90$$

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

- 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 $p_a + \rho g y$, ця величина обумовлює величину зони забруднення. Такі ж закономірності справедливі і для $0 < \alpha < 90$. При $\alpha = 90$ можна оцінити глибину, на яку проникає забруднююча речовина із залежності $p_d = \rho g y$, звідки визначаємо y . Так, якщо робочий тиск в трубопроводі складає 1 МПа. Оскільки густина породи 8000 кг/метр куб, то глибина проникнення забруднюючих речовин в ґрунт сягає 12,5 метрів. Після цього виникає зворотна дифузія. Враховуючи (6)-(13), можна зробити висновок про те, що величина 12,5 є завищеною, оскільки не враховувалась в'язкість суміші, величина проникності середовища; структура ґрунту в зоні трубопроводу

Висновки. У результаті проведеного дослідження удосконалено методику розрахунку швидкості витoku суміші при втраті герметичності з причини виникнення критичних напружень в матеріалі труби. Досліджено зміну характеристик потоку в трубопроводі при зміні складу транспортованої суміші шляхом вивчення впливу зміни динамічної в'язкості. Проведено порівняльний аналіз величини вказаної швидкості в залежності від динамічної в'язкості багатокomпонентної газової суміші.

Одержано формулу для оцінки розмірів зони, на яку при аварії проникає забруднююча речовина. Ця формула може

бути застосована для подальших досліджень.

Список використаних джерел

1. Олійник А.П. Математичні моделі процесу квазістаціонарного деформування трубопроводних та промислових систем при зміні їх просторової конфігурації: Наукове видання. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2010. 320с.

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

3. Chapman L., Heald C., Krause T. Origin of a magnetic easy axis in pipeline steel. *J. Appl. Phys.* 1999. Vol. 86. № 36. P. 1574–1580.

4. Cline A. K. Scalar and Planar Valued Curve Fitting Using Splines Under Tension. *Communications of the ACM*. vol.17, № 4, P.218-228.

5. Олійник А.П., Райтер П. М., Вершинін Ю. А. Моделювання потоків рідин в трубопроводі та дослідження стійкості різницевої схем. *Методи та прилади контролю якості*. 2016. №1(36). С. 48-53.

6. Олійник А.П., Григорчук Г. В., Говдяк Р. М. Застосування методів математичного моделювання для оцінки технічного стану трубопроводів та стану довкілля. *Методи та прилади контролю якості*. 2019. №1(42). С 97-103.

7. Жовтуля Л. Я., Олійник А. П., Яворський А. В., Цих В. С., Побережний Л. Я. Визначення зміни напружено-деформованого стану ділянки підземного трубопроводу за даними безконтактного позиціонування з поверхні землі. *Методи та прилади контролю якості*. 2017. №2(39). С. 14 – 22.

8. Олійник А.П. Розробка системи оцінки аеродинамічних характеристик лопатей осьового компресора

газоперекачувального агрегату. *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*. 2011. №2(28). С. 19-22.

9. Oliinyk A.P., Shtayer L. O. Modelling of fluid flow in pipeline with the leaks due to surface. *Journal of Hydrocarbon Power Engineering*. 2014. Vol 1. Issue 1. P. 45-52.

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

11 Семчук, Я. М., Палійчук Л. В. Основні завдання і методи досліджень для обґрунтування охорони підземних вод в районі видобутку калійних солей. *Науковий вісник ІФНТУНГ*. 2007. №1(15). С. 164-167.

12. Трубопровідний транспорт газу. Київ, 2002. 600с.

References

1. Oliinyk A.P. Matematychni modeli protsesu kvazistatsionarnoho deformuvannya truboprovodnykh ta promyslovykh system pry zmini yikh prostorovoi konfihuratsii: Naukove vydannia. Ivano-Frankivsk: IFNTUNH, 2010. 320p. [in Ukrainian]

2. Zhovtulia L. Ya., Oliinyk A. P., Yavorskyi A. V., Karpash M. O. Rozroblennia metodyky otsinky napruzhenno – deformovanoho stanu liniinykh dilianok mahistralnykh truboprovodiv. *Metody ta prylady kontroliu yakosti*. №1(38). 2017. P. 57 -63. [in Ukrainian]

3. Chapman L., Heald C., Krause T. Origin of a magnetic easy axis in pipeline steel. *J. Appl. Phys.* 1999. Vol. 86. № 36. P. 1574–1580.

4. Cline A. K. Scalar and Planar Valued Curve Fitting Using Splines Under Tension. *Communications of the ACM*. vol.17, № 4, P.218-228.

5. Oliinyk A.P., Raiter P. M., Vershynin Yu. A. Modeliuvannya potokiv ridynv truboprovodi ta doslidzhennia stiikosti riznytsevykh skhem. *Metody ta prylady*

kontroliu yakosti. 2016. №1(36). P. 48-53. [in Ukrainian]

6. Oliinyk A.P., Hryhorchuk H. V., Hovdiak R. M. Zastosuvannia metodiv matematychnoho modeliuvannya dlia otsinky tekhnichnoho stanu truboprovodiv ta stanu dovkillia. *Metody ta prylady kontroliu yakosti*. 2019. №1(42). P. 97-103. [in Ukrainian]

7. Zhovtulia L. Ya., Oliinyk A.P., Yavorskyi A. V., Tsykh V. S., Poberezhnyi L. Ya. Vyznachennia zminy napruzhenodeformovanoho stanu dilianky pidzemnoho truboprovodu za danymy bezkontaktноho pozytsionuvannya z poverkhni zemli. *Metody ta prylady kontroliu yakosti*. 2017. №2(39). P. 14 – 22. [in Ukrainian]

8. Oliinyk A.P. Rozrobka systemy otsinky aerodynamichnykh kharakterystyk lopatei osovoho kompresora hazoperekachovalnoho ahrehatu. *Naukovyi visnyk Ivano-Frankivskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu nafty i hazu*. 2011. № 2(28). p. 19-22. [in Ukrainian]

9. Oliinyk A.P., Shtayer L. O. Modelling of fluid flow in pipeline with the leaks due to surface. *Journal of Hydrocarbon Power Engineering*. 2014. Vol 1. Issue 1. P. 45-52.

10. Dubovoi V.M., Kviehnyi R.N., Mykhalov O.I., Usov A.V. Modeliuvannia ta optymizatsiia system: pidruchnyk. Vinnytsia, PP «Edelweis», 2017. 804 p

11..Semchuk, Ya. M., Paliichuk L. V. Osnovni zavdannia i metody doslidzhen dlia obgruntuvannia okhorony pidzemnykh vod v raioni vydobutku kaliinykh solei. *Naukovyi visnyk IFNTUNH*. 2007. №1(15). P. 164-167. [in Ukrainian]