

## ОЦІНКА ВПЛИВУ ХАРАКТЕРИСТИК РІДИНИ ТА ПАРАМЕТРІВ ПОТОКУ НА РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕЧІЇ В'ЯЗКОЇ РІДИНИ З ВІДТОКОМ ЧЕРЕЗ ГРАНИЦЮ ОБЛАСТІ

Л.О. Штаєр

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 48000,  
e-mail: lida.shtayer@gmail.com

*Розглянуто особливості застосування різних типів математичних моделей для опису течії рідини в зоні витоків. Досліджено поля швидкостей при обтіканні тіла з відбором рідини. Вивчено вплив на вказані поля кінематичної в'язкості речовини, швидкості відбору та швидкості незбуреної рідини. Узагальнено результати досліджень з метою їх використання при визначенні малих витоків продуктів з трубопроводу. Проведено розрахунки для різних типів рідин та газів, здійснено порівняльний аналіз результатів розрахунків, виявлено межі застосування пропонованої методики.*

Ключові слова: трубопровід, відбір рідини, моделювання, тиск, виток рідини

*Рассмотрены особенности применения различных типов математических моделей для описания течения жидкости в зоне утечек. Исследовано поле скоростей при обтекании тела с отбором жидкости. Изучено влияние на указанные поля кинематической вязкости вещества, скорости отбора и скорости невозмущенной жидкости. Обобщены результаты исследований с целью их использования при определении малых утечек продуктов из трубопровода. Проведены расчеты для разных типов жидкостей и газов, проведен сравнительный анализ результатов расчетов, обнаружены пределы применения предлагаемой методики.*

Ключевые слова: трубопровод, отбор жидкости, моделирование, давление, утечки жидкости

*The application peculiarities of different types of mathematical models to describe the liquid flow in the leakage area have been considered. The velocity field in the process of the body's flow with the liquid's extraction has been investigated. The undisturbed liquid's velocity, the extraction velocity and kinematic viscosity influence on the state fields has been studied. The results of the investigations have been generalized having the aim to use for solving the problem connected with the product's low leakage from pipeline determination. The calculations for different kinds of liquid and gases have been made, the analysis to compare the results for different kinds of materials has been presented, the limits of the application of presented method have been defined.*

Keywords: pipeline, liquid's extraction, modeling, pressure, liquid leakage

Знаходження місць витоків з трубопроводів є актуальним науково-технічним завданням, завдяки чому вдасться попередити негативні економічні та екологічні наслідки таких аварій. Існуючі методи виявлення витоків [1, 2], як правило, не передбачають застосування математичних моделей. Водночас, існує значна кількість теоретичних розробок [3], які пропонують достатньо ефективні розрахункові алгоритми для попередньої оцінки величини витоків. Серед існуючих теоретичних моделей розглядаються наступні: з метою вивчення поведінки незбуреної течії аналізується задача про течію в'язкої рідини в трубі круглого перерізу, розглядаються задачі про течію рідини вздовж пластини зі сталим відбором рідини за сталого тиску та при його зміні за лінійним законом по поздовжній координаті, вивчається можливість точних розв'язків системи рівнянь Нав'є-Стокса (при цьому встановлюються відповідні граничні та початкові умови), за припущення, що процес транспортування вуглеводнів характеризується значними відстанями, система рівнянь Нав'є-Стокса зводиться до нелінійної системи одновимірної течії рідини по циліндричній трубі, а за наявності припущень про малу зміну параметрів потоку використовується акустичне наближення для розв'язку вказаної задачі. Кожна з наведених моделей має свої пе-

реваги та недоліки, проте їх спільний розгляд дає змогу вивчити всі особливості процесу як на макроскопічному рівні, коли важливою є інформація про вплив дефекту на течію по довжину труби, так і на локальному рівні, коли вивчається поведінка рідини безпосередньо в зоні витоків.

Саме такою моделлю є модель обтікання пластини регулярним потоком рідини. При цьому метою вивчення особливостей поведінки різних типів рідини, що транспортується, для виявлення закономірностей, є формування профілю швидкості поздовжньої компоненти в залежності від типу рідини. При цьому розглядається поведінка рідин та газів, для яких проводились дослідження інших властивостей, пов'язаних з особливістю витоків [4].

В даній роботі для побудови ефективних теоретичних та апаратних методів [1, 2] визначення місця розташування зон витоків продуктів з трубопроводів проводиться моделювання течії в'язкої рідини в геометрично простій області. Одержані результати дають підстави для якісних висновків про поведінку об'єктів з більш складною геометричною конфігурацією.

Розглядається процес обтікання необмеженої за лінійними розмірами пластини потоком, який на достатній відстані від поверхні вважається рівномірним, зі швидкістю  $U_{\infty}$ . Через по-

верхню здійснюється рівномірний відбір рідини або газу з постійною швидкістю  $V_0$  ( $V_0 > 0$ ) [3]. В системі координат  $Oxy$ , пов'язаною з поверхнею пластини, записуються рівняння Нав'є-Стокса в стаціонарній двовимірній постановці:

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

де:  $\nu$  – кінематична в'язкість;  $p$  – тиск;  $\rho$  – густина;  $\vec{V}(u, v)$  – швидкість.

Описано [3] випадок течії з відбором характеризується такими граничними умовами:

$$\begin{aligned} u = 0; v = -V_0; y = 0 \quad (V_0 > 0); \\ u \rightarrow U_\infty, y \rightarrow \infty. \end{aligned} \quad (2)$$

Виходячи з умов (2), можна зробити висновок про те, що їм відповідає розв'язок системи (1), який не залежить від  $x$ :

$$u = u(y); v = -V_0; p = \text{const}. \quad (3)$$

Вказані припущення, які стосуються формування течії в зоні над пластиною, можуть бути застосовані для опису течії рідини в трубці, оскільки характерні розміри трубопроводів (діаметри, товщини стінок) дозволяють розглядати локально внутрішню поверхню трубопроводу як фрагмент площини. Крім того, слід зазначити, що при оцінці величини та інтенсивностей витоків дослідника, як правило, цікавлять ефекти на відстані від поверхні  $0,1 - 0,2 D_{mp}$ , де  $D_{mp}$  – діаметр трубопроводу.

Очевидно, що в такому випадку два останні рівняння (1) виконуються тотожно, а перше рівняння записується у вигляді:

$$-V_0 \frac{du}{dy} = \nu \frac{d^2u}{dy^2}, \quad (4)$$

після інтегрування якого [5] з урахуванням (2) одержуємо:

$$u = U_\infty \left( 1 - \exp\left(-\frac{V_0 y}{\nu}\right) \right). \quad (5)$$

При аналізі залежності (5) встановлюється, що профіль швидкостей експоненційно залежить від вертикальної координати, що відповідає реальній фізичній картині процесу в трубопроводах – основні ефекти проявляються в невеликій за відстанню зоні від поверхні труби. Однак залежність (5) не дозволяє врахувати особливості просторового розташування ефекту (на дні труби, на верхній чи боковій поверхні). Модельно ці моменти можна розрізняти шляхом, наприклад, задання різної швидкості відбору речовини з поверхні: вона має бути найбільшою на дні труби та мінімальною на поверхні.

Формула (5) визначає профіль швидкості вздовж горизонтальної осі в залежності від вертикальної координати. Визначальними параметрами (5) є величина коефіцієнта кінематичної в'язкості рідини  $\nu$ ,  $\text{см}^2/\text{с}$ ; швидкості відбору рідини через поверхню  $-V_0$  (знак “-” означає, що досліджується саме випадок відбору рідини; у випадку закачування рідини в область цей знак змінився б на протилежний); а також швидкості незбуреної рідини  $U_\infty$ . Залежність від  $U_\infty$  є фактично лінійною, тому особливий інтерес викликає дослідження впливу на величини  $u(y)$  саме значень  $\nu$  та  $V_0$ . Проводяться дослідження профілю швидкості  $u = u(y)$  [3] для таких рідин та газів [4]: води ( $\nu = 0,01 \text{ см}^2/\text{с}$ ); повітря ( $\nu = 0,13 \text{ см}^2/\text{с}$ ); бензину ( $\nu = 0,0077 \text{ см}^2/\text{с}$ ); метану ( $\nu = 0,157 \text{ см}^2/\text{с}$ ); аміаку ( $\nu = 0,127 \text{ см}^2/\text{с}$ ) та дизельного палива ( $\nu = 0,045 \text{ см}^2/\text{с}$ ) для широкого діапазону швидкості відбору рідини та газу ( $V_0 = 0,001 \div 10 \text{ см}/\text{с}$ ). Величина  $U_\infty$  приймається рівною  $500 \text{ см}/\text{с}$ .

Досліджено профіль швидкості потоку при  $V_0 = 0,02 \text{ см}/\text{с}$  для вказаних речовин. Результати розрахунків наведено в таблиці 1.

Аналізуючи одержані результати, можна зробити висновок про те, що для рідини (вода, бензин, дизельне паливо) зона впливу на значення поздовжньої компоненти швидкості наявності відбору є досить малою – вказані ефекти практично зникають на відстані до  $2 \text{ см}$  від поверхні відбору для води та бензину, і  $10 \text{ см}$  для дизельного пального. Це означає, що при використанні моделі течії з відбором загальний вплив відбору на профіль швидкості є несуттєвим, в той час як для газів (повітря, аміак, метан) характер такого впливу в кількісному відношенні є значним.

Проведено дослідження профілю швидкості речовини по горизонтальній осі для бензину в залежності від швидкості відбору речовини. Результати розрахунків наведено в таблиці 2.

Аналізуючи одержані дані, можна зробити висновок про те, що вплив на профіль швидкості є більш значним за малих швидкостей відбору, а вже при величині  $V_0 = 0,2 \text{ см}/\text{с}$  вплив відбору на профіль швидкості практично відсутній.

Досліджено вплив на профіль горизонтальної компоненти швидкості для метану за різних швидкостей відбору продукту ( $V_0 = 0,02; 0,08; 0,14; 0,2; 0,56; 0,83 \text{ см}/\text{с}$ ). Результати розрахунків наведено в таблиці 3.

Аналізуючи одержані результати, встановлено, що, на відміну від рідини (бензину), вплив відбору для метану є більш суттєвим. Наприклад, при  $V_0 = 0,02 \text{ см}/\text{с}$  вплив відбору відчувається на відстані  $22 \text{ см}$  від поверхні відбору, в той час як для бензину такий вплив практично відсутній. З метою вивчення вказаного впливу дослідження для бензину та метану проводились для різних значень швидкості відбору  $V_0$ .

**Таблиця 1 – Розподіл швидкості потоку по горизонтальній координаті для різних речовин**

$U$ , см/с $y$ , см	швидкість потоку для різних типів рідин					
	вода	повітря	бензин	метан	аміак	дизпаливо
2,00	490,8422	132,4293	497,2274	112,4554	135,0912	294,4438
4,00	499,8323	229,7835	499,9846	199,6183	233,6831	415,4933
6,00	499,9969	301,3526	499,9999	267,1774	305,6372	465,2583
8,00	499,9999	353,9661	500,0000	319,5417	358,1506	485,7172
10,00	500,0000	392,6444	500,0000	360,1287	396,4758	494,1282
12,00	500,0000	421,0785	500,0000	391,5872	424,4462	497,5860
14,00	500,0000	441,9815	500,0000	415,9704	444,8595	499,0076
16,00	500,0000	457,3482	500,0000	434,8696	459,7575	499,5920
18,00	500,0000	468,6449	500,0000	449,5181	470,6303	499,8323
20,00	500,0000	476,9496	500,0000	460,8720	478,5655	499,9310
22,00	500,0000	483,0547	500,0000	469,6723	484,3567	499,9717

**Таблиця 2 – Розподіл швидкості потоку по горизонтальній координаті для бензину за різних швидкостей відбору речовини через поверхню**

$V_0$ , см/с $y$ , см	швидкості потоку за різних значень $V_0$					
	0,001	0,005	0,008	0,2	1,2	2,4
2,00	114,3741	363,5570	437,4050	500,0000	500,0000	500,0000
4,00	202,5853	462,7666	492,1637	500,0000	500,0000	500,0000
6,00	270,6183	489,8395	499,0190	500,0000	500,0000	500,0000
8,00	323,0890	497,2274	499,8772	500,0000	500,0000	500,0000
10,00	363,5570	499,2434	499,9846	500,0000	500,0000	500,0000
12,00	394,7681	499,7935	499,9981	500,0000	500,0000	500,0000
14,00	418,8397	499,9437	499,9998	500,0000	500,0000	500,0000
16,00	437,4050	499,9846	500,0000	500,0000	500,0000	500,0000
18,00	451,7235	499,9958	500,0000	500,0000	500,0000	500,0000
20,00	462,7666	499,9989	500,0000	500,0000	500,0000	500,0000
22,00	471,2837	499,9997	500,0000	500,0000	500,0000	500,0000

**Таблиця 3 – Розподіл швидкості потоку по горизонтальній координаті для метану за різних швидкостей відбору речовини через поверхню**

$V_0$ , см/с $y$ , см	швидкості потоку за різних значень $V_0$					
	0,02	0,08	0,14	0,2	0,56	0,83
2,00	112,4554	319,5417	415,9704	460,8720	499,6011	499,9872
4,00	199,6183	434,8696	485,8781	496,9380	499,9997	500,0000
6,00	267,1774	476,4933	497,6267	499,7604	500,0000	500,0000
8,00	319,5417	491,5161	499,6011	499,9812	500,0000	500,0000
10,00	360,1287	496,9380	499,9330	499,9985	500,0000	500,0000
12,00	391,5872	498,8949	499,9887	499,9999	500,0000	500,0000
14,00	415,9704	499,6011	499,9981	500,0000	500,0000	500,0000
16,00	434,8696	499,8560	499,9997	500,0000	500,0000	500,0000
18,00	449,5181	499,9480	499,9999	500,0000	500,0000	500,0000
20,00	460,8720	499,9812	500,0000	500,0000	500,0000	500,0000
22,00	469,6723	499,9932	500,0000	500,0000	500,0000	500,0000

## Література

Аналізуючи одержані результати, можна встановити таку закономірність: профіль швидкості змінюється тим сильніше, чим меншою є швидкість витoku продукту з трубопроводу. Це пояснюється тим, що за малих швидкостей витoku ( $V_0 \rightarrow 0$ ) вказана модель фактично еквівалентна моделі обтікання пластини або моделі течії Пуазейля в'язкої рідини по трубі. В такому випадку фактично виконується умова непротікання рідини, а профіль швидкості є близьким до параболічного. Цей ефект відсутній за великих швидкостей відбору, оскільки в такому випадку умова непротікання відсутня і всі ефекти проявляються лише в пограничному шарі рідини [3].

## Висновки

На основі проведених досліджень та розрахунків можна зробити такі висновки стосовно застосованості математичних методів моделювання процесу локальних витоків:

– для рідин та газів поведінка течії за наявності стаціонарного відбору через поверхню є суттєво різною, що визначається значенням їх кінематичної в'язкості  $\nu$ ;

– розглянута модель вивчає процес обтікання пластини, тому її адаптація на випадок дослідження витоків з трубопроводів може бути проведена наступним чином: необхідним є врахування геометрії об'єкта, зокрема за великих значень діаметра труби вказана модель є більш прийнятною, ніж для трубопроводів з малими діаметрами;

– встановлення факту того, що для рідин вплив відбору на профіль є тим більшим, чим менша швидкість відтоку, може бути обґрунтованим тим, що течію в трубопроводах, в яких здійснюється малий відбір, можна розглядати як течію з малими збуреннями. При цьому слід зазначити, що малі значення  $V_0$  швидкості відбору для вказаних трубопроводів можуть характеризувати декілька моделей процесу, серед яких слід виділити такі: а) течія з дефектами (отворами) малих розмірів, для яких рідина фактично просочується через поверхню; б) течія з дефектами великих розмірів, при яких проводиться зупинка трубопроводу через його фактичний прорив;

– методи діагностування витоків з використанням апарату математичного моделювання є більш прийнятними для вивчення витоків з газопроводів, тоді як для нафто- та продуктопроводів необхідно розробляти інші (наприклад, акустичні) методи, що базуються на проведеному певних фізичних експериментів.

1 Неразрушающий контроль и диагностика: справочник / [ Клюев В. В., Соснин Ф. Р., Ковалев А. В. и др.] ; под ред. В. В. Клюева. – М. : Мишиностроение, 2003. – 656 с.

2 Карпаш О.М. Технічна діагностика систем нафтогазопостачання / О.М. Карпаш, М.П. Возняк, В.М. Василюк. – Івано-Франківськ: Факел, 2007. – 341 с.

3 Шкадов В. Я. Течение вязкой жидкости / В.Я. Шкадов, З.Д. Запрянов. – М.: Из-во Моск. ун-та, 1984. – 200 с.

4 Заміховський Л.М. Дослідження впливу частоти генерування тестових сигналів на максимальну відстань виявлення витоків з трубопроводів / Л.М. Заміховський, Л.О. Штаєр, В.А. Ровінський // Методи та прилади контролю якості. – Івано-Франківськ, 2010. – № 25. – С. 60-66.

5 Meredith F. W. Modern Developments in Fluid Dynamics / F. W. Meredith, A. A. Griffith. – Oxford University Press, Vol. 2, 1938. – 534 p.

*Стаття надійшла до редакційної колегії  
08.07.11*

*Рекомендована до друку професором  
Юрчишиним В.М.*