

МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРОГАЗОДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ У ЗАКРИТИХ ПЕРЕПУСКНИХ КАНАЛАХ РІЗНОГО ПЕРЕРІЗУ

Сергій Баранович, к. т. н., Ігор Стукалець, к. т. н.,
Роман Шеремета, к. т. н., Сергій Коробка, к. т. н., Михайло Бабич, к. т. н.
Львівський національний університет природокористування,
вул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни, Львівський р-н, Львівська обл., Україна,
e-mail: baranovich1977@ukr.net; igorstukalets@gmail.com; romansheremeta@ukr.net;
korobkasv@ukr.net., m.babych@ukr.net

<https://doi.org/10.31734/agroengineering2023.27.108>

Баранович С., Стукалець І., Шеремета Р., Коробка С., Бабич М. Методики дослідження гідрогазодинамічних процесів у закритих перепускних каналах різного перерізу

Розглянуто різні методики дослідження гідрогазодинамічних процесів у закритих перепускних каналах з різним поперечним перерізом. Одна з використаних методик передбачала аналітичний підхід, який відрізнявся складністю математичних розрахунків та наступною візуалізацією гідрогазодинамічних процесів з використанням системи MATLAB. Цей метод дозволив детально проаналізувати особливості каналу та відтворити явища ламінарного режиму перетікання рідин і газів у ньому, надаючи глибше розуміння їхньої природи.

Інша методика передбачала проведення імітаційного комп'ютерного моделювання процесів ламінарного режиму перетікання рідини та газу каналами різного поперечного перерізу в середовищі SOLIDWORKS Flow Simulation. Для застосування цієї методики були задані вхідні параметри та умови, і отримані результати були докладно проаналізовані та інтерпретовані. Цей підхід надавав можливість створити реалістичні комп'ютерні моделі гідрогазодинамічних явищ, дозволяючи дослідникам докладно вивчати їхню поведінку та взаємодію в умовах різних перерізів каналів.

Порівняння результатів, отриманих за допомогою обох методик, вказало на адекватність відтворення гідрогазодинамічних процесів у закритих перепускних каналах з різним перерізом. Отримані дані не тільки підтвердили точність обраних методів аналізу, а й розширили розуміння перетікання рідини та газу за умови ламінарного руху. Це дослідження відкриває нові горизонти для подальших наукових досліджень у сфері гідрогазодинамічних явищ і може бути застосоване у важливих інженерних проектних розрахунках, де необхідна висока точність, відповідність дійсності та надійність обчислень гідрогазодинамічних процесів.

Ключові слова: гідрогазодинаміка, технологічний канал, система *MATLAB*, середовище *SOLIDWORKS Flow Simulation*.

Baranovych S., Stukalets I., Sheremeta R., Korobka S., Babych M. Methods of researching hydro-gas-dynamic processes in closed bypass channels of different cross-sections

The article considers different methods of researching the hydro-gas-dynamic processes in closed bypass channels with different cross-sections. One of the used methods involved an analytical approach, which was distinguished by the complexity of mathematical calculations and the subsequent visualization of hydro-gas-dynamic processes using the MATLAB system. This method facilitated a detailed analysis of the channel's features and reproduction of the phenomena of a laminar mode of the flow of liquids and gases in it, providing a deeper understanding of their nature.

Another technique involved simulation computer modeling of the processes of laminar flow of liquid and gas through channels of different cross-sections in the SOLIDWORKS Flow Simulation environment. To apply this technique, the input parameters and conditions were specified, and the obtained results were analyzed and interpreted in detail. This approach was used to create realistic computer models of hydro-gas-dynamic phenomena, allowing researchers to deeply study their behavior and interaction in the conditions of different cross-sections of channels.

A comparison of the results obtained using both methods indicated the adequacy of their reproduction of hydro-gas-dynamic processes in closed bypass channels with different cross-sections. The obtained data not only confirmed the accuracy of the chosen methods of analysis but also expanded the understanding of the flow of liquid and gas under the conditions of their laminar movement. This research opens up new horizons for further scientific studies in the field of hydro-gas-dynamic phenomena and can be applied in important engineering design calculations where high accuracy and reliability of hydro-gas-dynamic process calculations are required.

Key words: hydro-gas-dynamics, technological channel, *MATLAB* system, *SOLIDWORKS Flow Simulation* environment.

Постановка проблеми. Теоретичні за-
сади визначення продуктивності довгих закри-
тих каналів з ламінарним режимом руху рідин і
газів ґрунтуються на коефіцієнті Пуазейля,

який розроблений для каналу круглого пере-
різу, а на практиці закриті канали, які з'єд-
нують камери елементів конструкцій різного
типу

механізмів і машин, виконуються трикутного або прямокутного перерізу, тому теорія перетікання такими каналами вимагає уточнення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Розглянувши теоретичні засади перехідних процесів у теоріях розрахунку закритих технологічних каналів, бачимо, що використовується K_p – коефіцієнт Пуазейля [2-5; 7; 8; 11; 12], який визначають за формулою

$$K_p = \frac{\pi D^4}{128 \eta l}, \quad (1)$$

де D – діаметр каналу, мм;
 l – довжина каналу, мм;
 η – коефіцієнт в'язкості, мм.

Використання цього коефіцієнта в обчисленнях гідрогазодинамічних характеристик закритих технологічних каналів є справедливим тільки для круглих перерізів, інші ж форми перерізів потребують додаткових досліджень.

Постановка завдання. Для визначення гідрогазодинамічних характеристик закритих технологічних каналів використовують формули, в яких застосовують коефіцієнт Пуазейля, що визначається з виразу (1), який передбачає перетікання рідин і газів каналами круглого перерізу. Однак на практиці технологічні канали в елементах конструкцій виконують також квадратного, прямокутного, трикутного та іншої форми перерізу, оскільки їх виготовлення є технологічно простішим, а відповідно й менш затратним у виробництві. Тому виникає потреба розробити й дослідити методику визначення гідрогазодинамічних характеристик закритих технологічних каналів з різними геометричними перерізами.

Виклад основного матеріалу. Проведемо розрахунки гідрогазодинамічних характеристик каналів з круглим і квадратним перерізом [5]. Визначимо швидкість і продуктивність перетікання рідин і газів. Для рівняння пропускної здатності каналів різної конфігурації будемо вважати, що їхні площі перерізів A однакові.

Для каналу круглого перерізу (рис. 1) диференціальне рівняння Нав'є-Стокса у полярній системі координат, враховуючи симетрію [1], матиме вигляд:

$$\frac{d^2 g}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dg}{dr} = -k, \quad (2)$$

$$\text{де } k = \frac{1}{\eta} \frac{dp}{dx};$$

η – динамічна в'язкість рідини (газу), Па/с;

p – тиск рідини (газу), Па;
 g – швидкість перетікання повітря в каналі, м/с.

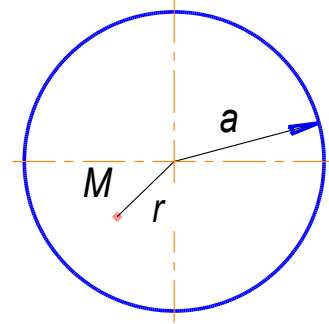


Рис. 1. Розрахункова схема для визначення швидкості руху рідин і газів каналом круглого перерізу

Fig. 1. Calculation scheme for determining the speed of movement of liquids and gases along the channel under the conditions of a circular cross-section

Розв'язок рівняння 1 матиме такий вигляд:

$$g = -\frac{k \cdot r^2}{4} + C_1 \ln r + C_2, \quad (3)$$

де C_1, C_2 – числові сталі, які за належно вибраних значень дають будь-який частковий розв'язок рівняння.

Оскільки швидкість обмежена, то $C_1 = 0$, а значення сталої C_2 знаходимо з граничної умови, при $r = a, g = 0 \rightarrow C_2 = \frac{k \cdot a^2}{4}$.

Отже,

$$g = \frac{k}{4} (a^2 - r^2). \quad (4)$$

Тоді продуктивність

$$\begin{aligned} Q &= \iint_A \rho g dA = \int_0^a \frac{k \rho}{4} (a^2 - r^2) \cdot 2\pi r dr = \\ &= \frac{\pi k \rho}{r} \left(\frac{a^2 r^2}{2} - \frac{r^4}{4} \right) \Big|_0^a = \frac{\pi k \rho a^4}{8}. \end{aligned} \quad (5)$$

Тоді радіус каналу круглого перерізу

$$\frac{a^2}{\sqrt{\pi}}$$

і його пропускна здатність

$$Q = \frac{k \rho a^4}{8\pi} = 0,0398 k \rho a^4. \quad (6)$$

Розподіл зміни швидкості руху рідин і газів каналом круглого перерізу зображено на рис. 3 [6; 10].

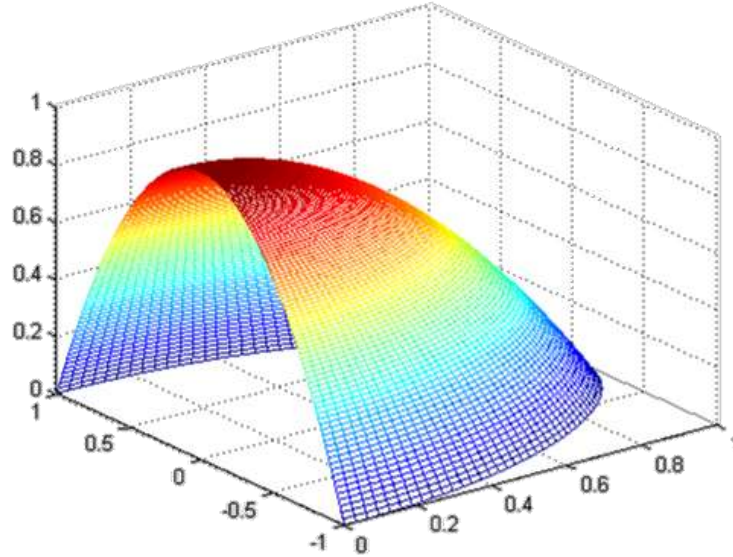


Рис. 2. Графік розподілу швидкості каналом круглого перерізу в системі *MATLAB*
Fig. 2. Graph of velocity distribution along a circular channel in the *MATLAB* system

Для каналу квадратного перерізу (рис. 3) диференціальне рівняння Нав'є-Стокса матиме такий вигляд:

$$\frac{d^2 \vartheta}{dy^2} + \frac{d^2 \vartheta}{dz^2} = -k. \quad (7)$$

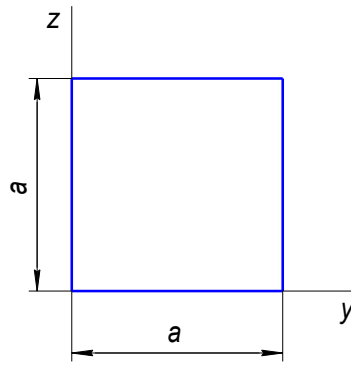


Рис. 3. Розрахункова схема для визначення швидкості руху рідин і газів каналом квадратного перерізу
Fig. 3. Calculation scheme for determining the speed of movement of liquids and gases in a channel with a square section

Отже, формула для визначення швидкості руху повітря в каналі квадратного перерізу матиме остаточно такий вигляд [1]:

$$\vartheta = \frac{4ka^2}{\pi^3} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin\left(\frac{\pi(2n-1)y}{a}\right)}{(2n-1)^3} \times \left(1 - \operatorname{ch}\left(\frac{\pi(2n-1)z}{a}\right) + \frac{\operatorname{ch}(\pi(2n-1)) - 1}{\operatorname{sh}(\pi(2n-1))} \operatorname{sh}\left(\frac{\pi(2n-1)z}{a}\right)\right) \quad (8)$$

Обчислимо витрату повітря

$$Q = \rho \int_0^a \int_0^a \vartheta dy dz = 8 \frac{4ka^4 \rho}{\pi^4} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^4} \times \left(1 - \frac{2(\operatorname{ch}(\pi(2n-1)) - 1)}{\pi(2n-1)\operatorname{sh}(\pi(2n-1))}\right) = 0,0351ka^4 \rho \quad (9)$$

Швидкості руху рідин і газів каналом квадратного перерізу зображено на рис. 4.

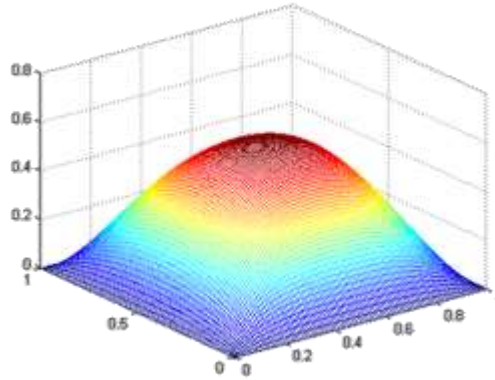


Рис. 4. Графік розподілу швидкості руху рідин і газів каналом квадратного перерізу в системі *MATLAB*
Fig. 4. Graph of velocity distribution along a square channel in the *MATLAB* system

Обчислення показують, що у виразі суми достатньо взяти 2 або 3 доданки. Підтвердженням цього є складена програма в середовищі *MATLAB*.

Отримані рівняння дозволяють більш точно визначити гідрогазодинамічні процеси в перепускних каналах різного перерізу, які використовуються в техніці.

Методика імітаційного моделювання гідрогазодинамічних процесів у середовищі *SOLIDWORKS Flow Simulation* [9; 13; 14] передбачає насамперед створення твердотілої геометричної моделі каналу певного поперечного перерізу,

визначення області дослідження, обмеженої об'ємом каналу, задання вхідних параметрів процесу (швидкісних або об'ємних характеристик) та умов дослідження. Твердотілу модель каналу перетворюють у сіткову з розміром елементів, який забезпечить достатню точність результатів. Задання цілей дослідження залежить від результатів, які необхідно отримати. Кінцевим етапом моделювання є аналіз одержаних результатів та їх інтерпретація. Для візуального сприйняття отриманих результатів будують діаграми, як показано на рис. 5, 6.

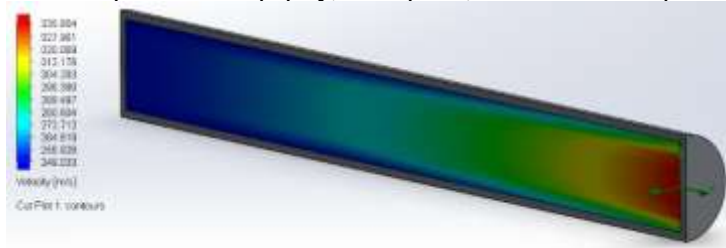


Рис. 5. Діаграма розподілу швидкості каналом круглого перерізу з використанням модуля *Flow Simulation* системи *SOLIDWORKS*

Fig. 5. Plot of velocity distribution along a circular channel using the *Flow Simulation* module of the *SOLIDWORKS* system

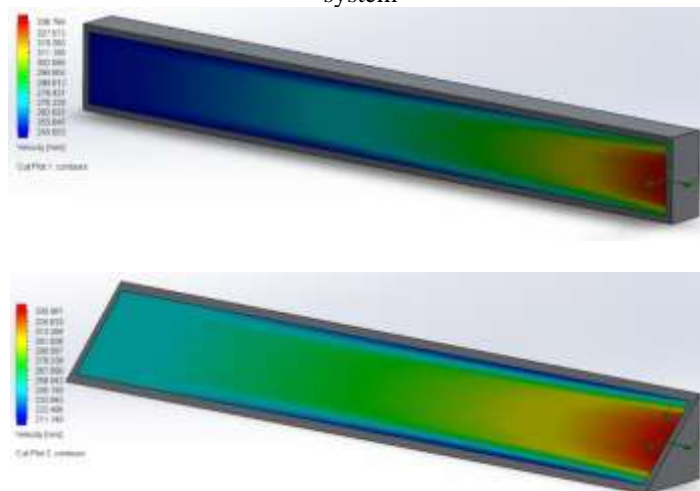


Рис. 6. Діаграма розподілу швидкості каналом квадратного перерізу з використанням модуля *Flow Simulation* системи *SOLIDWORKS*

Fig. 6. Plot of velocity distribution along a square channel using the *Flow Simulation* module of the *SOLIDWORKS* system

Як бачимо, вищенаведені методики показують майже однакові характеристики відтворення гідрогазодинамічних процесів у закритих перепускних каналах.

Висновки. Отримано залежності для визначення характеру впливу геометричних параметрів перерізу перепускних каналів на гідрогазодинамічні процеси, які впливають на підвищення точності визначення характеристик процесу роботи закритих каналів.

Порівняння отриманих залежностей відтворення гідрогазодинамічних характеристик роботи перепускних каналів у двох системах *MATLAB* та *SOLIDWORKS Flow Simulation* показує, що динамічні залежності в обох випадках є подібними і можуть використовуватися під час конструювання виробів, які містять перепускні канали закритого типу.

Бібліографічний список

1. Баранович С. М. Обґрунтування параметрів пульсатора доїльного апарата з регульованою тривалістю такту ссання: дис. ... канд. техн. наук. Львів, 2015. 165 с.
2. Колчунов В. І. Теоретична та прикладна гідромеханіка: навч. посіб. Київ: НАУ, 2004. 336 с.
3. Константінов Ю. М., Гіжа О. О. Технічна механіка рідини і газу: [підручник]. Київ: Вища шк., 2002. 277 с.
4. Кулініченко В. Р. Гідравліка, гідравлічні машини і гідропривід: підручник. Київ: Фірма «Інкос», Центр навч. літ., 2006. 616 с.
5. Кулініченко В. Р. Гідродинаміка: навч. посіб Київ: НМК ВО, 1992. 272 с.
6. Пейч Л. И., Точилин Д. А., Поллак Б. П. LabVIEW для новичков и специалистов. Москва: Горячая линия-Телеком, 2004. 384 с.
7. Турик В. М. Гідрогазодинаміка: курс лекцій: навч. посіб. для студ. спеціальностей 142 Енергетичне машинобудування, 143 Атомна енергетика, 144 Теплоенергетика / КПІ ім. Ігоря Сікорського. Електронні текстові дані (1 файл: 8,37 Мбайт). Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 145 с.
8. Свирень Н. О., Петренко Н. Н. Приложение законов гидродинамики к особенностям пневматических высевающих аппаратов. *Збірник наукових праць Кіровоградського інституту сільськогосподарського машинобудування: Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація.* 1998. № 2. С. 177-180.
9. Стукалець І. Г. Основи інженерного аналізу технічних об'єктів: курс лекцій для студентів інженерних спеціальностей. Львів: ЛНУП, 2022. 109 с.
10. Тревис Дж. LabVIEW для всех / пер. с англ. Н. А. Клушина; под ред. В. В. Шаркова, В. А. Гурьева. Москва: ДМК Пресс; ПриборКомплект, 2005. 544 с.
11. Цяпко М. Ф., Мамаєв Л. М. Гідрогазодинаміка. Київ: ІСДМО, 1995. 211 с.
12. Цяпко М. Ф., Яловий М. І., Павленко А. М. Гідрогазодинаміка. Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2009. 264 с.
13. An Introduction to Flow Analysis Applications with SolidWorks Flow Simulation: Student Guide. Dassault Systèmes SolidWorks Corporation, 2013. 19 p.
14. SolidWorks, "SOLIDWORKS Flow Simulation," Dassault Systemes. URL: <https://www.solidworks.com/sw/products/simulation/flow-simulation.htm> (Last accessed: 15.05.2023).

Стаття надійшла 20.06.2023