

С.М. Баранович¹, І.Г. Стукалець¹, С.В. Коробка¹, М.І. Бабич¹,
М.М. Толстушко², Н.О. Толстушко²

¹Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій
імені С.З. Гжицького.

²Луцький національний технічний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРОГАЗОДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ У ЗАКРИТИХ ПЕРЕПУСКНИХ КАНАЛАХ КРУГЛОГО ТА ТРИКУТНОГО ПЕРЕРІЗУ

Розглянуто різні методи аналізу гідрогазодинамічних процесів у закритих перепускних каналах з круглою і трикутною формою поперечного перерізу. Одним з використаних підходів був аналітичний метод, який передбачав складні математичні обчислення та подальшу візуалізацію процесів за допомогою системи MATLAB. Цей підхід дав змогу детально дослідити характеристики каналу та відтворити явища ламінарного потоку рідин і газів, що дозволило глибше зрозуміти їхні фізичні особливості.

Інший метод полягав у використанні імітаційного комп'ютерного моделювання процесів ламінарного потоку рідини та газу через канали з круглою та трикутною формою поперечного перерізу за допомогою програмного забезпечення SOLIDWORKS Flow Simulation. Для реалізації цього підходу були задані необхідні вхідні параметри та умови, а отримані результати піддалися детальному аналізу та інтерпретації. Цей метод дозволив створювати високоточні комп'ютерні моделі гідрогазодинамічних процесів, що дало змогу глибше дослідити їхню поведінку та взаємодію в умовах різноманітних форм поперечних перерізів каналів.

Порівняння результатів, отриманих за допомогою обох методів, підтвердило їхню здатність адекватно моделювати гідрогазодинамічні процеси в закритих перепускних каналах з круглою та трикутною формою поперечного перерізу. Дані, що були отримані, не лише підтвердили точність вибраних методів, але й дозволили глибше зрозуміти механізми перетікання рідин та газів за умови ламінарного руху. Це дослідження відкриває нові можливості для подальших наукових розробок у галузі гідрогазодинаміки і має потенціал для застосування в інженерних розрахунках, де важливими є висока точність, достовірність і надійність моделей гідрогазодинамічних процесів.

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

S. Baranovych, I. Stukalets, S. Korobka, M. Babych, M. Tolstushko, N. Tolstushko

STUDY OF HYDRO-GAS-DYNAMIC PROCESSES IN CLOSED BYPASS CHANNELS WITH CIRCULAR AND TRIANGULAR CROSS-SECTIONS

The study examines various methods for analyzing hydrogasodynamic processes in closed bypass channels with circular and triangular cross-sections. One of the approaches used was the analytical method, which involved complex mathematical calculations followed by process visualization using the MATLAB system. This approach enabled a detailed investigation of the channel characteristics and the reproduction of laminar flow phenomena of liquids and gases, allowing for a deeper understanding of their physical features.

Another method involved the use of simulation-based computer modeling of the laminar flow of liquid and gas through channels with circular and triangular cross-sections using SOLIDWORKS Flow Simulation software. To implement this approach, the necessary input parameters and conditions were specified, and the resulting data were subjected to detailed analysis and interpretation. This method allowed for the creation of highly accurate computer models of hydrogasodynamic processes, facilitating a deeper exploration of their behavior and interaction under various cross-sectional shapes of the channels.

A comparison of the results obtained from both methods confirmed their ability to adequately model hydrogasodynamic processes in closed bypass channels with circular and triangular cross-sections. The data obtained not only validated the accuracy of the chosen methods but also provided a deeper understanding of the mechanisms of liquid and gas flow under laminar conditions. This research opens new opportunities for further scientific developments in the field of hydrogasodynamics and has the potential for application in engineering calculations where high precision, reliability, and credibility of hydrogasodynamic models are crucial.

Key words: hydrogas dynamics, technological channel, MATLAB system, SOLIDWORKS Flow Simulation.

Постановка проблеми. Теоретичні основи визначення продуктивності довгих закритих каналів з ламінарним потоком рідин і газів базуються на коефіцієнті Пуазейля, розробленому для каналів круглого поперечного перерізу. Однак на практиці закриті канали, які з'єднують камери елементів різних конструкцій механізмів і машин, часто мають трикутну або прямокутну форму перерізу. Тому теорія перетікання через такі канали потребує додаткового уточнення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проаналізувавши теоретичні основи перехідних процесів у розрахунках закритих технологічних каналів, можна відзначити, що застосовують K_p – коефіцієнт Пуазейля [3, 4, 8, 10, 11], який визначається за формулою:

© С.М. Баранович, І.Г. Стукалець, С.В. Коробка, М.І. Бабич,
М.М. Толстушко, Н.О. Толстушко

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

де D – діаметр каналу, м; l – довжина каналу, м; η – коефіцієнт в'язкості, Па·с.

Застосування цього коефіцієнта для розрахунку гідрогазодинамічних характеристик закритих технологічних каналів є коректним лише для каналів круглого поперечного перерізу. Для інших форм перерізів необхідні додаткові дослідження.

Постановка завдання. Для обчислення гідрогазодинамічних характеристик закритих технологічних каналів застосовуються формули, що включають коефіцієнт Пуазейля, який обчислюється за виразом (1) і передбачає потік рідин та газів через канали круглого поперечного перерізу. Проте на практиці технологічні канали в конструкціях часто виконуються з квадратними, прямокутними, трикутними або іншими формами перерізів, оскільки їх виготовлення є більш простим і економічно вигідним. Тому виникає необхідність розроблення та вивчення методів визначення гідрогазодинамічних характеристик для закритих каналів різних геометричних перерізів.

Викладення основного матеріалу. Здійснимо розрахунки гідрогазодинамічних характеристик для каналів круглого та трикутного поперечного перерізу [6, 11]. Визначимо швидкість потоку та продуктивність перетікання рідин і газів. Для рівняння пропускної здатності каналів різних форм припустимо, що їх площі перерізів A є рівними.

Для каналу круглого перерізу (рис. 1.) диференціальне рівняння Нав'є-Стокса у полярній системі координат, враховуючи симетрію [1, 2], матиме вигляд:

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

де $k = \frac{1}{\eta} \frac{dp}{dx}$; η – динамічна в'язкість рідини (газу), Па·с; p – тиск рідини (газу), Па; g –

швидкість перетікання рідин і газів по каналу, м/с.

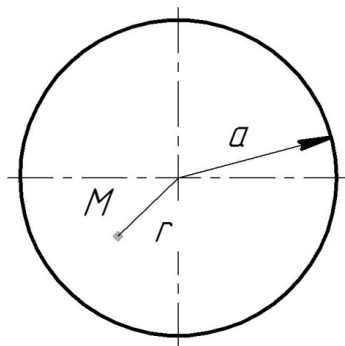


Рис. 1. Розрахункова схема для визначення швидкості руху рідин і газів каналом круглого перерізу

Розв'язок рівняння 1 матиме наступний 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.

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

© С.М. Баранович, І.Г. Стукалець, С.В. Коробка, М.І. Бабич,
М.М. Толстушко, Н.О. Толстушко

$$Q = \iint_A \rho \vartheta dA = \int_0^a \frac{k\rho}{4} (a^2 - r^2) \cdot 2\pi r dr =$$

$$= \frac{\pi k \rho}{r} \left(\frac{a^2 r^2}{2} - \frac{r^4}{4} \right) \Big|_0^a = \frac{\pi k \rho a^4}{8}. \quad (5)$$

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.

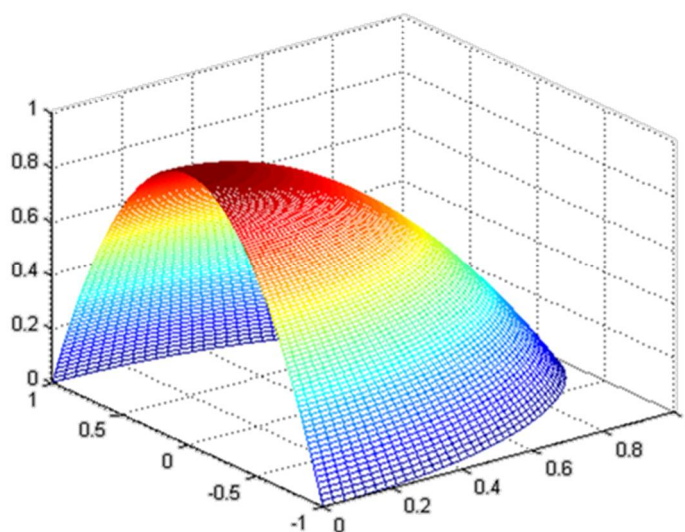


Рис. 2. Графік розподілу швидкості каналом круглого перерізу в системі *MATLAB*

Для каналу трикутного перерізу, використаємо розрахункову схему (рис. 3):

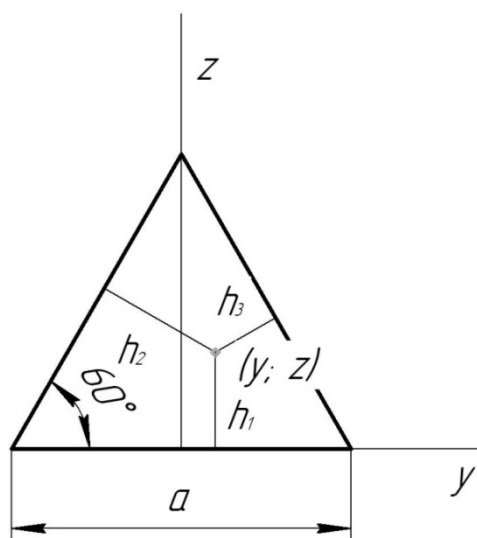


Рис. 3. Розрахункова схема для визначення швидкості руху рідин і газів каналом трикутного перерізу

Висоти, опущені з довільної точки трикутника на його сторони, визначаються, як:

$$h_1 = z;$$

$$h_2 = \frac{\sqrt{3}a}{4} + \frac{\sqrt{3}}{2}y - \frac{1}{2}z; \quad (7)$$

$$h_3 = \frac{\sqrt{3}a}{4} - \frac{\sqrt{3}}{2}y - \frac{1}{2}z.$$

Рівняння швидкості руху повітря матиме такий вигляд:

$$\vartheta = \frac{\Delta p}{l} \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{h_1 \cdot h_2 \cdot h_3}{a \cdot \eta} = kz \left(\frac{3}{16}a^2 - \frac{3}{4}y^2 + \frac{1}{4}z^2 - \frac{\sqrt{3}a}{4}z \right). \quad (8)$$

Тоді продуктивність:

$$\begin{aligned} Q &= \iint_A \rho \vartheta dy dz = 2k \int_0^{\frac{a}{2}} \rho dy \int_0^{\frac{\sqrt{3}}{2}a - \sqrt{3}y} \left(\frac{3}{16}a^2 z - \frac{3}{4}y^2 z + \frac{1}{4}z^3 - \frac{\sqrt{3}a}{4}z^2 \right) dz = \\ &= 2k\rho \int_0^{\frac{a}{2}} dy \left(\frac{3}{32}a^2 z^2 - \frac{3}{8}y^2 z^2 + \frac{1}{16}z^4 - \frac{\sqrt{3}a}{12}z^3 \right) \Bigg|_0^{\frac{\sqrt{3}}{2}a - \sqrt{3}y} = \\ &= 2k\rho \int_0^{\frac{a}{2}} \frac{9a^2}{32} \left(\left(\frac{a}{2} - y \right)^2 - \frac{9}{8}y^2 \left(\frac{a}{2} - y \right)^2 + \frac{9}{16} \left(\frac{a}{2} - y \right)^4 - \frac{9}{12}a \left(\frac{a}{2} - y \right)^3 \right) dy = \\ &= 2k\rho \left(-\frac{3a^2}{32} \left(\frac{a}{2} - y \right)^3 - \frac{9}{8} \left(\frac{a^2}{4} \frac{y^3}{3} - a \frac{y^4}{4} + \frac{y^5}{5} \right) - \frac{9}{16 \cdot 5} \left(\frac{a}{2} - y \right)^5 + \frac{9}{12}a \left(\frac{a}{2} - y \right)^4 \cdot \frac{1}{4} \right) \Bigg|_0^{\frac{a}{2}} = \\ &= 2k\rho a^5 \left(\frac{3}{32 \cdot 8} + \frac{9}{80} \cdot \frac{1}{32} - \frac{9}{8} \left(\frac{1}{4} \cdot \frac{1}{24} - \frac{1}{64} + \frac{1}{160} \right) - \frac{9}{48} \cdot \frac{1}{16} \right) = k\rho a^5 \cdot \frac{3}{640}. \end{aligned} \quad (9)$$

З попередньо записаної умови про те, що площі перерізів однакові та дорівнюють $A = a^2$, сторона каналу трикутного перерізу дорівнює $\frac{2a}{\sqrt{3}}$ і пропускна здатність:

$$Q = \frac{\sqrt{3}k\rho}{320} \frac{16a^4}{3} = \frac{k\rho a^4}{20\sqrt{3}} = 0,0289k\rho a^4. \quad (10)$$

Залежність зміни швидкості руху повітря з трикутним перерізом каналу зображена на рис. 4.

Розрахунки показують, що для виразу суми достатньо використати лише два або три доданки. Це підтверджується програмою, розробленою в середовищі MATLAB.

Розроблені рівняння забезпечують більш точне визначення гідрогазодинамічних процесів у перепускних каналах з різними поперечними перерізами, що застосовуються в технічних системах.

Метод імітаційного моделювання гідрогазодинамічних процесів у середовищі SOLIDWORKS Flow Simulation [9, 12, 13] включає кілька етапів. Спочатку створюється тривимірна геометрична модель каналу з визначеним поперечним перерізом, потім задається область дослідження, обмежена об'ємом каналу. Наступним кроком є задання вхідних параметрів процесу, таких як швидкість або об'ємні характеристики, а також умов для моделювання. Твердотілу модель перетворюють у сітку скінченних елементів, задаючи розмір елементів, що забезпечить необхідну точність результатів. Цілі дослідження задаються в залежності від потрібних результатів. Завершальним етапом є аналіз отриманих результатів і їх інтерпретація. Для візуалізації результатів використовуються діаграми, як показано на рис. 5, 6.

Як видно, описані вище методи демонструють практично однакові результати у відтворенні гідрогазодинамічних процесів у закритих перепускних каналах.

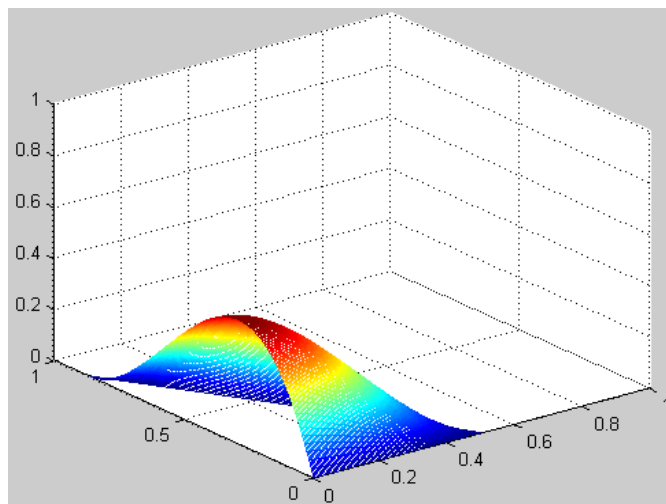


Рис. 4. Графік розподілу швидкості каналом трикутного перерізу в системі *MATLAB*

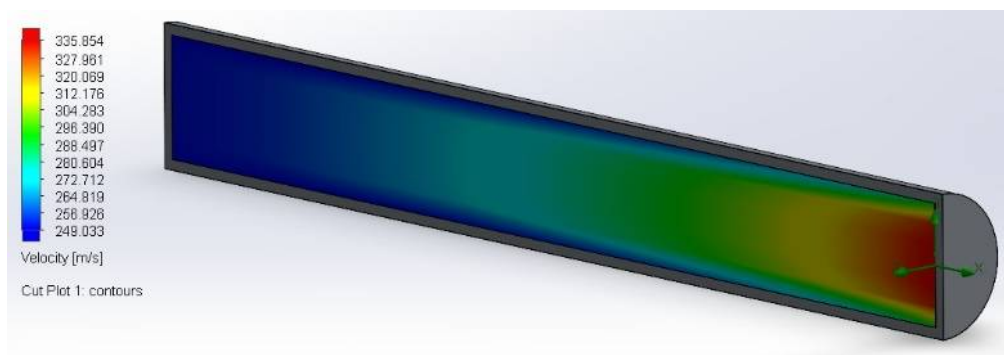


Рис. 5. Діаграма розподілу швидкості каналом круглого перерізу з використанням модуля *Flow Simulation* системи *SOLIDWORKS*

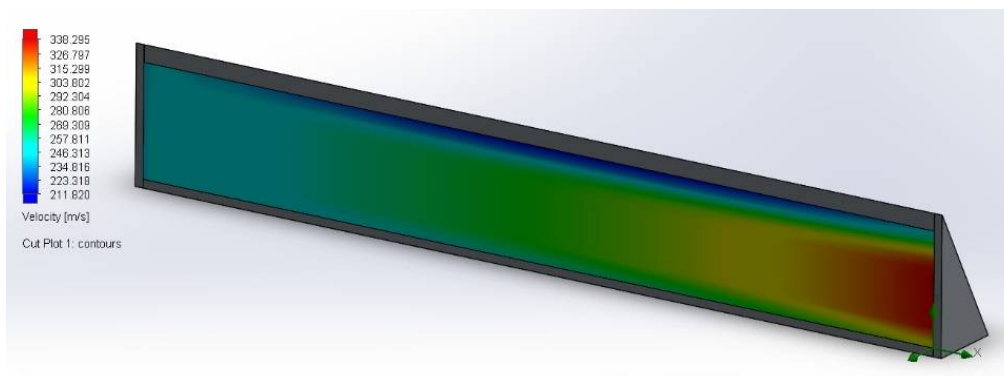


Рис. 6. Діаграма розподілу швидкості каналом трикутного перерізу з використанням модуля *Flow Simulation* системи *SOLIDWORKS*

Висновки. Встановлено залежності, що описують вплив геометричних параметрів перерізу перепускних каналів на гідрогазодинамічні процеси, що сприяють підвищенню точності визначення характеристик роботи закритих каналів.

Порівняння отриманих залежностей гідрогазодинамічних характеристик роботи перепускних каналів у системах *MATLAB* та *SOLIDWORKS Flow Simulation* демонструє схожість динамічних залежностей в обох випадках, що дозволяє їх використовувати під час проектування виробів, що містять перепускні канали закритого типу.

Список використаних джерел

1. Баранович С.М. Обґрунтування параметрів пульсатора доїльного апарата з регульованою тривалістю такту ссання: дис. ... канд. техн. наук. Львів, 2015. 165 с.

© С.М. Баранович, І.Г. Стукалець, С.В. Коробка, М.І. Бабич,
М.М. Толстушко, Н.О. Толстушко

2. Баранович С., Стукалець І., Шеремета Р., Коробка С., Бабич М.. Методики дослідження гідрогазодинамічних процесів у закритих перепускних каналах різного перерізу. Вісник Львівського національного університету природокористування. Серія Агроінженерні дослідження, (27), 108–112. <https://doi.org/10.31734/agroengineering2023.27.108>.
3. Константинов Ю. М. Технічна механіка рідини і газу [Підручник] / Ю. М. Константинов, О. О. Гіжа. – К.: Вища школа, 2002. – 277 с.
4. Кулінченко В. Р. Гідравліка, гідравлічні машини і гідропривід: Підручник.-Київ: Фірма «Інкос», Центр навчальної літератури, 2006. — 616с.
5. Колчунов В. І. Теоретична та прикладна гідромеханіка: Навч. Посібник. — К.: НАУ, 2004. – 336 с.
6. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. В 10 томах. -Том VI. - Гидродинамика. - М.: Наука, 1988. -736 с.
7. Лазарев Ю. Ф. Початки програмування у середовищі MatLAB: Навч. посібник. – К.: "Корнійчук", 1999. – 160 с.
8. Свирень Н. О. Приложение законов гидродинамики к особенностям пневматических высевающих аппаратов / Н. О. Свирень, Н. Н. Петренко // 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.Цяпко М. Ф., Мамаєв Л. М. Гідрогазодинаміка – К.: ІСДМО, 1995 – 211 с.
- 11.Цяпко М. Ф., Яловий М. І., Павленко А. М. Гідрогазодинаміка – Дніпродзержинськ; ДДТУ, 2009. – 264 с.
- 12.An Introduction to Flow Analysis Applications with SolidWorks Flow Simulation, Student Guide : Dassault Systèmes SolidWorks Corporation, 2013. – 19 p.
- 13.SolidWorks, “SOLIDWORKS Flow Simulation,” Dassault Systemes. URL: <https://www.solidworks.com/sw/products/simulation/flow-simulation.htm>. (дата звернення: 15.05.2023).

Рецензент Дідух Володимир Федорович, доктор технічних наук, професор кафедри аграрної інженерії імені професора Г.А. Хайліса Луцького національного технічного університету, Заслужений діяч науки і техніки України.