

Н. Ф. ДИМИТРІЄВА**МОДЕЛЮВАННЯ ВИХРОВОЇ СТРУКТУРИ ВСЕРЕДИНИ ВЕНТИЛЬОВАНОЇ КАВЕРНИ**

Дана робота присвячена проблемі моделювання примусово вентильованої газоподібної каверни в потоці рідини. Актуальність дослідження обумовлено необхідністю розвитку методів керування потоком з метою зниження опору тертя. Аналіз літературних джерел показав, що внутрішня структура течії всередині каверни, яка визначає її форму, розмір та стійкість, залишається маловивченою. Запропоновано методику чисельного моделювання нестационарної тривимірної двофазної течії в програмному пакеті з відкритим вихідним кодом OpenFoam. Було використано модель interFoam для двох нестисливих суцільних середовищ без фазового переходу, яка базується на підході Volume of Fluid (VOF). Розрахункову сітку побудовано методом покрокового подрібнення комірок з використанням утиліти snappyHexMesh для генерації тривимірної неструктурованої сітки з переважанням гекса-елементів, що враховує дрібномасштабні структури течії в зоні фазового переходу та поблизу обтічного тіла. Результати розрахунків показали якісну узгодженість з теоретичними та експериментальними даними. Описано складну вихрову структуру всередині вентильованої порожнини. Виділено три зони: постійного тиску, в'язкої дифузії та двофазного шару змішування. Виявлено, що на відміну від парової суперкаверни за стійкою частиною надлишки повітря утворюють бульбашковий слід. Було проведено аналіз впливу геометричних та динамічних параметрів на формування та розвиток повітряної каверни, її розмір, форму та стійкість. Виявлено, що довжини зон каверни залежать від швидкості основного потоку рідини та витрати газу, що нагнітається, а товщина каверни визначається діаметром кавітатора. Показано, що за рахунок штучної вентиляції подовжується і підтримується зона постійного тиску.

Ключові слова: гідродинаміка, двофазна течія, суперкавітація, порожнина, чисельне моделювання, OpenFoam, snappyHexMesh, метод об'єму рідини (VOF).

N. F. DIMITRIEVA**MODELING OF THE VORTEX STRUCTURE INSIDE A VENTILATED CAVITY**

This work is devoted to the problem of modelling a forcibly ventilated gaseous cavity in a liquid flow. The relevance of the study is due to the need to develop flow control methods in order to reduce drag. An analysis of literary sources showed that the internal structure of the flow inside the cavity remains poorly understood. This determines its shape, size and stability. A method for numerical modeling of unsteady 3D – two-phase flow in the open-source software OpenFoam is proposed. The interFoam model was used for two incompressible fluids without phase transition. The mathematical modeling is based on the Volume of Fluid (VOF) approach. The computational mesh was constructed using the stepwise cell refinement method using the snappyHexMesh utility. The three-dimensional unstructured mesh consists mainly of hexa-elements. This takes into account small-scale flow structures in the phase transition zone and near the streamlined body. The calculation results showed qualitative agreement with theoretical and experimental data. A complex vortex structure inside a ventilated cavity is described. Three zones are distinguished: constant pressure, viscous diffusion, and two-phase mixing layer. It was found that, unlike a steam supercavity, excess air behind the stable part forms a bubble trail. An analysis of the influence of geometric and dynamic parameters on the formation and development of an air cavity, its size, shape, and stability was conducted. It was found that the lengths of the cavity zones depend on the velocity of the main fluid flow and the flow rate of the injected gas, and the thickness of the cavity is determined by the diameter of the cavitator. It has been shown that the constant pressure zone is extended and maintained due to forced ventilation.

Key words: fluid dynamics, two-phase flow, supercavitation, cavity, vortex, numerical simulation, OpenFoam, volume of fluid (VOF) method.

Вступ. Проблема *суперкавітації* як *методу керування потоком* відома з середини ХХ століття [1]. Суперкавітація – це, по суті, процес утворення окремої газової *бульбашки (порожнини)* за обтічним об'єктом. Явище природної *гідродинамічної кавітації* має локальний характер і виникає лише там, де є особливі умови для випаровування рідини. Такою умовою може бути, наприклад, локальне зниження тиску в рідині зі збільшенням швидкості за обтічним тілом. Якщо тіло розмістити за *кавітатором*, між твердою поверхнею та рідиною створюється газоподібний прошарок. Оскільки густина і в'язкість у такому газоподібному шарі значно нижчі, ніж у воді, можна досягти зменшення опору тертя.

Природну кавітацію важко контролювати при *нестационарному русі* обтічного тіла. Щоб створити та підтримувати стабільність каверни, повітря штучно вдувається всередину порожнини.

На сьогодні накопичено великий досвід досліджень у галузі суперкавітації [2, 3]. Необхідно відзначити роль команди академіка НАН України Г. В. Логвиновича, яка зробила значний внесок у теоретичне та експериментальне вивчення суперкавітації [3 – 6]. Комплексний підхід дозволив як розробити *експериментальну методологію*, так і побудувати *аналітичні та емпіричні моделі розрахунку суперкаверни в реальній рідині*.

Однак, внутрішня структура потоків усередині каверни, яка визначає її форму, розмір та стійкість у потоці, залишається маловивченою. Дана робота присвячена вивченню складних вихрових течій всередині каверни та впливу параметрів інжекції на перебудову вихрової структури.

На сьогоднішній день існує багато підходів до моделювання двофазних потоків. Однак, дана проблема залишається однією з найскладніших в *обчислювальній гідродинаміці*. Складна система рівнянь, що враховує зовнішні сили та міжфазні переходи, вимагає точних методів розв'язку та значної обчислювальної потужності.

В даній роботі запропоновано використовувати *підхід об'єму рідини (VOF – volume of fluid)*. Попередні розрахунки двофазних рідин для різних прикладних задач показали, що VOF забезпечує простий та економічний метод виявлення вільних поверхонь у 3D – сітках [7, 8].

Попередні дослідження природної суперкавітації. Було проведено тестові розрахунки утворення парової каверни в рідині, що рухається, з використанням *чисельної моделі InterPhaseChangeFoam* відкритого пакету

прикладних програм OpenFOAM [9].

Суперкаверна має кінцевий розмір, який головним чином залежить від швидкості основної течії рідини при фіксованому розмірі кавітатора. Водяна пара з каверни не відноситься у слід, тому що парова порожнина існує виключно в зоні низького тиску згідно з фазовою діаграмою води. Всередині порожнини в сліді за тілом спостерігається класична замкнена система вихорів, як показано на рис. 1. Зворотний потік обмежує довжину порожнини.

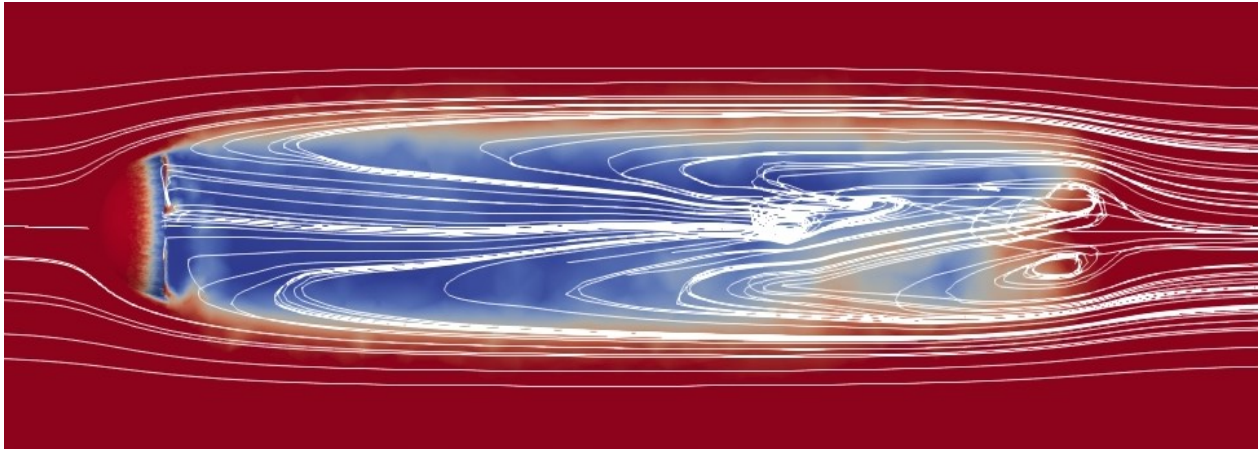


Рис. 1 – Лінії течії в центральному перерізі парової суперкаверни за швидкості $U_w = 20$ м/с (синій колір – повітря, червоний – вода, білий – лінії течії).

За низької швидкості потоку впливом випаровування рідкої фази можна нехтувати у зв'язку з відсутністю умови фазового переходу. Також попередні розрахунки вентильованої порожнини показали, що внесок стисливості та турбулентної моделі в систему визначальних рівнянь був незначним в діапазоні досліджуваних вхідних параметрів [8]. Додавання додаткових рівнянь лише ускладнило розрахунки, але не вплинуло на отримані результати.

Нижче представлено моделювання порожнини з примусовою штучною вентиляцією без фазового переходу в нестисливій рідині.

Математична модель. Досліджується двофазне нестисливе середовище вода-повітря в нестационарній тривимірній постановці.

Метод Volume of Fluid (VOF) використовується для вирішення задачі двофазного потоку [7]. Два середовища, що не змішуються, вважаються однією ефективною рідиною у всій розрахунковій області. Математичне моделювання задачі засноване на системі рівнянь механіки нестисливої рідини, яка включає рівняння нерозривності, Нав'є – Стокса, дифузії об'ємної частки фаз:

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial(u_i)}{\partial t} + u_j \frac{\partial(u_i)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} + f_{\sigma i}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + u_j \frac{\partial \alpha}{\partial x_j} = 0, \quad (3)$$

де $i, j = 1, 2, 3$; u_i – компонента поля швидкості; p – тиск; ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості; t – час; густина ρ розраховується як середньозважене значення на основі розподілу фазової частки (концентрації) рідини:

$$\rho = \alpha \rho_w + (1 - \alpha) \rho_a.$$

Тут ρ_w – густина води, ρ_a – густина повітря. Поверхневий натяг $f_{\sigma i}$ моделюється як поверхнева сила [10], яка розраховується наступним чином:

$$f_{\sigma i} = \sigma \kappa \frac{\partial \alpha}{\partial x_i}, \quad \kappa = \frac{\partial \eta_i}{\partial x_i} = -\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\partial \alpha / x_i}{|\partial \alpha / x_i|} \right),$$

де σ – константа поверхневого натягу; κ – кривизна поверхні розділу фаз [11].

Фазова частка α визначається у всіх комірках розрахункової сітки наступним чином: $\alpha = 1$, якщо локальна комірка повністю зайнята водою, $\alpha = 0$ – для повітря. Окремі комірки розрахункової сітки зі значенням α в діапазоні від 0 до 1 містять в собі вільну поверхню розділу фаз. Одним із найважливіших питань чисельного моделювання течій із вільною поверхнею з використанням підходу VOF є збереження фазової частки. Точний роз-

рахунок розподілу фазової частки має вирішальне значення для правильної оцінки кривизни поверхні. Необхідно визначити силу поверхневого натягу та відповідний градієнт тиску на вільній поверхні.

Таким чином, метод VOF забезпечує простий та економічний спосіб відстеження вільних меж.

Чисельна модель. Чисельне моделювання було виконано з використанням програмного пакету з відкритим вихідним кодом OpenFOAM методом скінченних об'ємів. Для розв'язання даної задачі було застосовано чисельну модель interFoam пакету OpenFOAM, що відповідає системі рівнянь (1 – 3) для двох нестисливих, ізотермічних середовищ без фазового переходу. Основною перевагою обраної моделі є можливість отримати прийнятні результати навіть із грубою сіткою [10].

Розрахункова область має розміри $30 \times 30 \times 110$ мм. На відстані 15 мм від початкової ділянки розташоване напівсферичне тіло (кавітатор) діаметром $d = 5$ мм. Було використано методику поетапного згущення *snappyHexMesh*, що призначена для автоматичної генерації тривимірних неструктурованих сіток [12]. На першому етапі було побудовано фонову гексадральну структуровану сітку з використанням утиліти *blockMesh*. Далі сітку було наближено до геометричної поверхні за допомогою ітераційного покращення фонові сітки та підгонки отриманих розщеплених гексаелементів. На наступному кроці проводиться додаткове розбиття елементів в заданих особливих областях, в результаті чого отримуємо «ступінчасту» сітку.

В побудованій розрахунковій сітці враховано дрібномасштабні елементи течії в зоні фазового переходу та поблизу обтічного тіла (рис. 2). Тривимірна сітка складається з близько $2,5 \cdot 10^6$ комірок, 98 % з яких є гексаелементами. Мінімальна комірка має об'єм порядку 10^{-5} мм³.

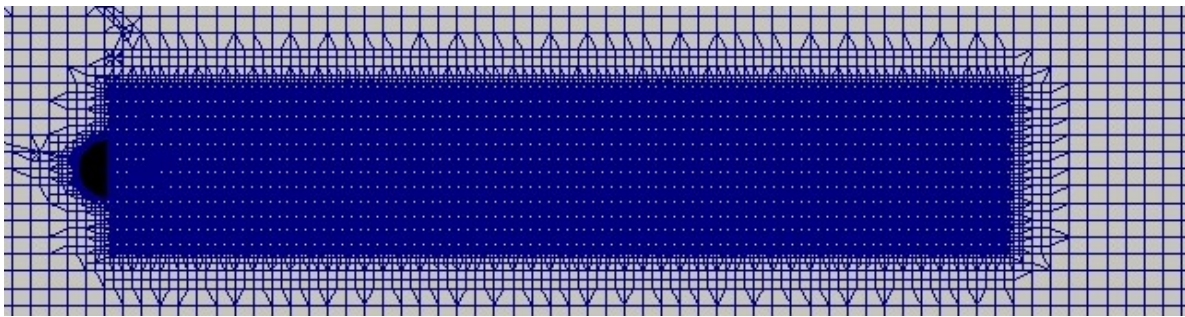


Рис. 2 – Розрахункова сітка.

На вході в розрахункову область було задано сталу швидкість рідини U_w , а на твердій стінці кавітатора – умову прилипання. Що стосується тиску, то на стінці кавітатора використовувалася гранична умова *fixedFluxPressure*, що є більш прийнятним, ніж стандартний *zeroGradient*, коли рівняння включають додаткові сили, такі як поверхневий натяг. Тиск на виході визначається нульовим.

У початковий момент часу $t = 0$ в усій розрахунковій області, за винятком зони вдуву повітря, задається рідка фаза $\alpha = 1$. Параметри вдуву було задано за допомогою утиліти попередньої обробки *setFields*. На задній пласкій стінці напівсфери було визначено отвір площею $S = 4$ мм², де задавалась відсутність рідкої фази $\alpha = 0$ і постійна швидкість повітря U_a . Використовуючи утиліту *setFields*, не було потреби перебудовувати сітку при зміні параметрів отвору.

Результати розрахунків. Чисельні результати показали, що в сліді за тілом утворюється стійка порожнина. Отримано гарну узгодженість з експериментальними даними [3, 12]. Результати розрахунків підтвердили, що стійкість форми вентиляваної каверни залежить від швидкості навколишньої рідини та витрати повітря. Відміну від парової порожнини за стійкою частиною надлишки повітря утворюють бульбашковий слід у зв'язку з відсутністю фазового переходу в системі вода-повітря.

В рамках даної роботи було проведено аналіз впливу геометричних та динамічних параметрів на формування та розвиток повітряної каверни. Товщина каверни залежить від діаметра кавітатора та не залежить від діаметра отвору для видування. Зменшення швидкості вдуву впливає на довжину двофазної кормової частини каверни і її стійкість. При збільшенні витрати газу удвічі довжина суцільної і двофазної частин каверни зростає майже у півтора рази. При цьому максимальний діаметр каверни практично не змінюється і дорівнює приблизно $1,35d$.

Більш детальне вивчення внутрішньої структури течії усередині порожнини виявило складну вихрову систему. На рис. 3 показана миттєва вихрова структура в центральному поздовжньому перерізі. Газоподібна фаза показана синім кольором, рідка – червоним, а лінії течії – білим.

Розвинену порожнину великої витягнутості можна умовно поділити на три зони. Перша зона досить чітко визначається межею молекулярного шару міжфазної поверхні повітря-вода. В центрі каверни спостерігається струмінь, довжина і діаметр якого залежать від умов вдуву повітря з кавітатора. Він зсуває вниз за потоком

класичну вихрову систему зі зворотним потоком в центрі, яку можна бачити в другій зоні. За рахунок в'язкої дифузії повітряна каверна заповнюється дрібними краплями води із зовнішнього потоку. Поверхня розділу фаз стає нестабільною, формуючи третю зону двофазного перемішування. Двофазний шар замикає каверну і утворює протяжний бульбашковий слід вниз за потоком.

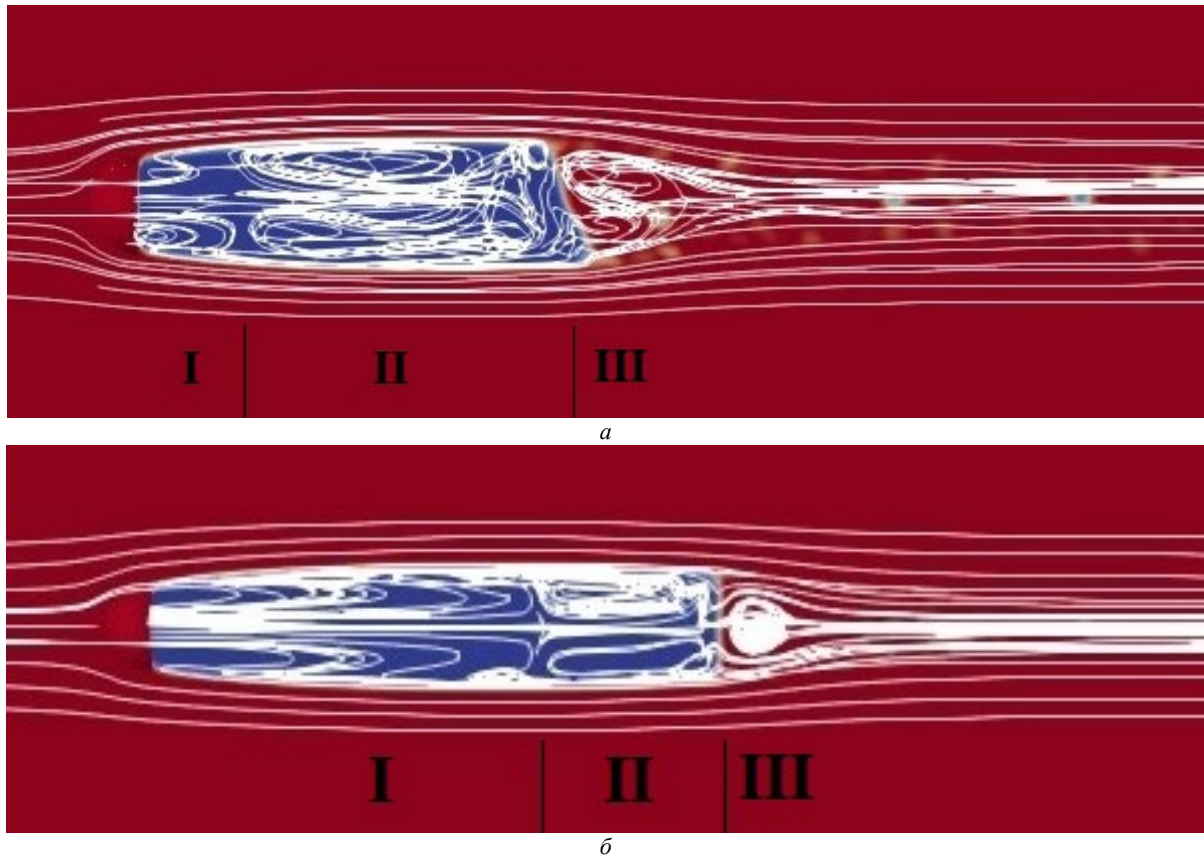


Рис. 3 – Центральний переріз вентильованої каверни залежно від швидкості вдуву повітря:
 $a - U_w = 1 \text{ м/с}, U_a = 1 \text{ м/с}$; $b - U_w = 1 \text{ м/с}, U_a = 2 \text{ м/с}$ (синій колір – повітря, червоний – вода, білий – лінії течії).

Така тризонна модель вентильованої каверни без урахування масових сил добре узгоджується з ранніми теоретичними дослідженнями Г. О. Воропаєва для осесиметричного випадку [13].

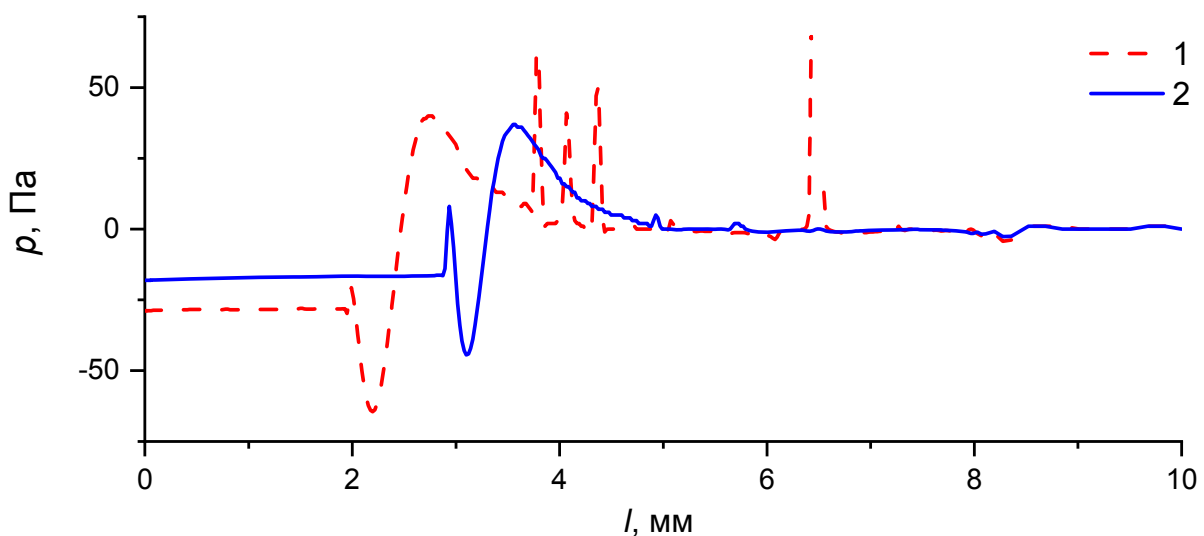


Рис. 4 – Розподіл тиску вздовж осі вентильованої каверни: 1 – $U_w = 1 \text{ м/с}, U_a = 1 \text{ м/с}$; 2 – $U_w = 1 \text{ м/с}, U_a = 2 \text{ м/с}$.

Зауважимо, що перша і третя зони, а також і двофазний бульбашковий слід не спостерігались у випадку природньої парової суперкавітації (рис. 1). Конденсація водяної пари запобігає формуванню газомісткого сліду вниз за потоком.

Рис. 4 ілюструє розподіл тиску вздовж поздовжньої осі за різних значень швидкості вдування повітря U_a . Результати розрахунків показують, що у першій і другій зонах каверни спостерігається постійний тиск. Нижче за потоком в третій зоні значення тиску різко змінюється. Також можна бачити розривну структуру профілю тиску в зонах розташування бульбашок в сліді за каверною.

На рис. 5 представлено поздовжню компоненту швидкості у центральному перерізі, що також ілюструє внутрішню структуру вентильованої повітряної порожнини. Можна бачити три чітко виражені зони, які було проілюстровано на рис. 2.

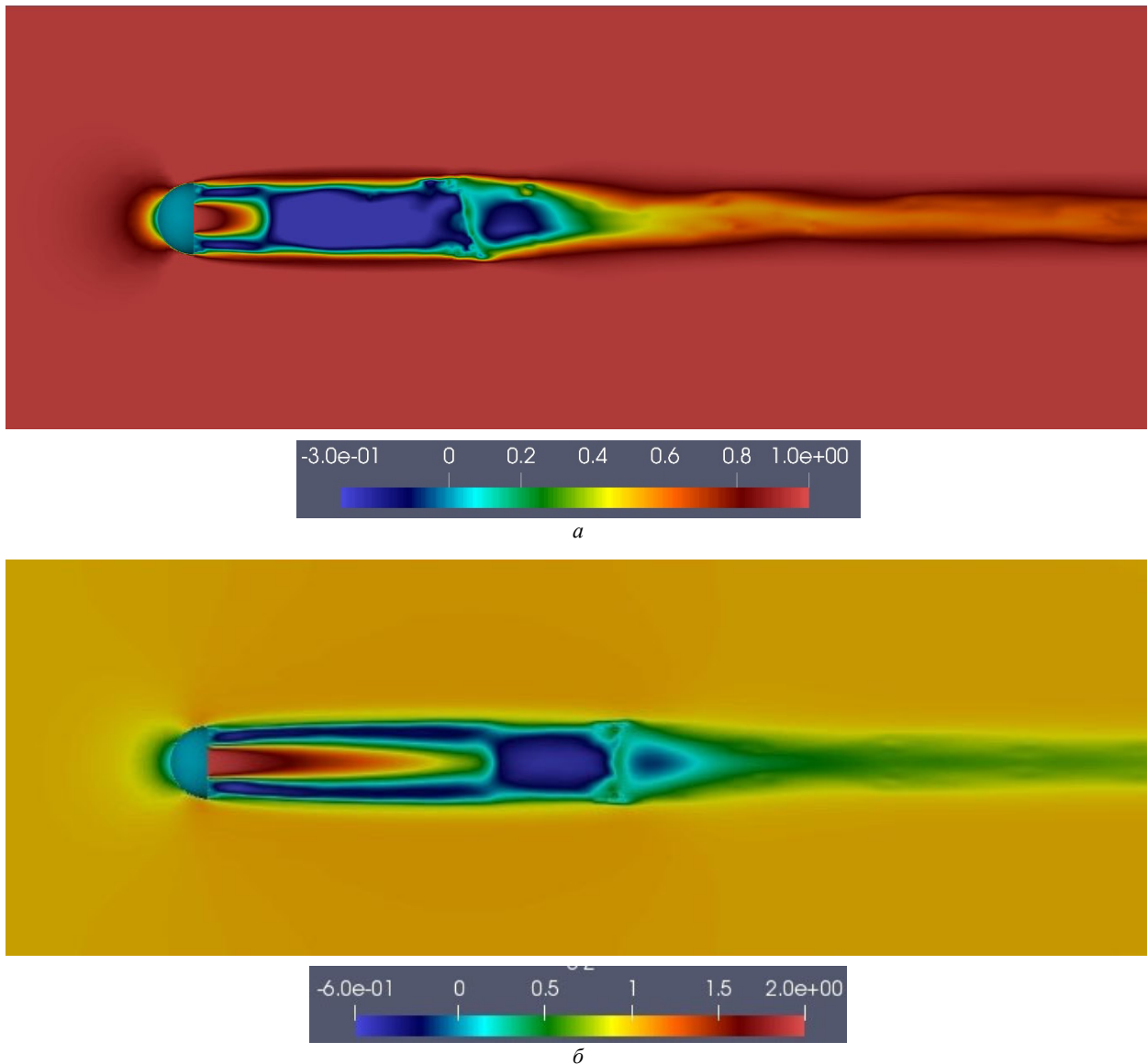


Рис. 5 – Поздовжня компонента швидкості в центральному перерізі вентильованої каверни:
 $a - U_w = 1 \text{ м/с}, U_a = 1 \text{ м/с}$; $b - U_w = 1 \text{ м/с}, U_a = 2 \text{ м/с}$.

При постійному тиску всередині каверни частина об'єму повітря залучається до руху навколишньої рідини і відноситься потоком в задню частину порожнини. Там уздовж осі каверни формується поворотний струмінь, що утворює циркуляційну вихрову зону. Така структура течії газу в каверні можлива, коли товщина внутрішнього примежового шару істотно менша за радіус каверни та відсутній масообмін через поверхню розділу фаз.

Висновки. Таким чином, у даній роботі запропоновано та успішно реалізовано методику чисельного моделювання нестационарної тривимірної двофазної течії в програмному пакеті з відкритим вихідним кодом OpenFoam. Отримано гарну узгодженість з теоретичними та експериментальними даними.

Проаналізовано складну вихрову структуру всередині вентильованої каверни. Виділено три зони, розміри яких залежать від швидкості основного потоку рідини та витрати газу, що нагнітається. Таким чином, за рахунок штучної вентиляції подовжується і підтримується зона постійного тиску.

Список літератури

1. Tulin M. P. Supercavitating flows. Small perturbation theory // *Journal of Ship Research*. – 1964. – Vol. 8. – P. 16 – 37.
2. Franc J.-P., Michel J.-M. Supercavitation // In: *Fundamentals of Cavitation. Fluid Mechanics and Its Applications*. – Dordrecht : Springer, 2005. – Vol. 76. – P. 97 – 130. DOI: 10.1007/1-4020-2233-6.
3. Nesteruk I. Supercavitation: Advances and Perspectives. A collection dedicated to the 70th jubilee of Yu. N. Savchenko. – Berlin and Heidelberg: Springer-Verlag, 2012. – 230 p. DOI: 10.1007/978-3-642-23656-3.
4. Логвинович Г. В., Серебряков В. В. Про методи розрахунку форми тонких осесиметричних каверн // *Гідромеханіка*. – 1975. – Т. 32. – С. 47 – 54.
5. Savchenko Yu., Semenenko V., Savchenko G. Peculiarities of supercavitating vehicles' maneuvering // *International Journal of Fluid Mechanics Research*. – 2019. – Vol. 46. – № 4. – P. 309 – 323. DOI: 10.1615/InterJFluidMechRes.v46.i4.30.
6. Semenenko V., Moroz V., Kochin V., Naumova O. Dynamics of supercavitating vehicles with cone cavitators // *Mechanics and Advanced Technologies*. – 2022. – Vol. 6. – № 1. – P. 85 – 95. DOI: 10.20535/2521-1943.2022.6.1.252889.
7. Hirt C. W., Nichols B. D. Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries // *Journal of Computational Physics*. – 1981. – Vol. 39. – № 1. – P. 201 – 225. DOI: 10.1016/0021-9991(81)90145-5.
8. Koval S. O., Dimitrieva N. F., Voropaiev G. O. Calculation of a Ventilated Cavity in OpenFOAM. In *Proc. Topical Problems of Fluid Mechanics*, ed. D. Šimurda and T. Bodnár. – Prague : Institute of Thermomechanics AS CR, 2023. – P. 88 – 95. DOI: 10.14311/TPFM.2023.013.
9. Димитрієва Н. Ф., Ворopaєв Г. О., Фаль В. О. Методика розрахунку утворення парової каверни за обтічним тілом // *Тези сьомої міжнародної науково-практичної конференції «Комп'ютерна гідромеханіка»*. – Київ : Інститут гідромеханіки НАН України, 2020. – С. 27 – 28.
10. Deshpande S. S., Anumolu L., Trujillo M. F. Evaluating the performance of the two-phase flow solver interFoam // *Computational science & discovery*. – 2012. – Vol. 5. – № 1. – P. 014016. DOI: 10.1088/1749-4699/5/1/014016.
11. Brackbill J. U., Kothe D. B., Zemach C. A continuum method for modeling surface tension // *Journal of Computational Physics*. – 1992. – Vol. 100. – № 2. – P. 335 – 354. DOI: 10.1016/0021-9991(92)90240-Y.
12. Ворopaєв Г. О., Коробов В. І., Димитрієва Н. Ф. Моделювання вентильованої каверни за обтічним тілом // *Журнал обчислювальної та прикладної математики*. – 2021. – Т. 8. – № 1. – С. 73 – 78. DOI: 10.17721/2706-9699.2021.1.09.
13. Ворopaєв Г. О. В'язке втягнення газу у вентильованій каверні заданої форми // *Прикладна гідромеханіка*. – 2013. – Т. 15(87). – № 1. – С. 10 – 23.

References (transliterated)

1. Tulin M. P. Supercavitating flows. Small perturbation theory. *Journal of Ship Research*. 1964, vol. 8, pp. 16–37.
2. Franc J.-P., Michel J.-M. Supercavitation. In: *Fundamentals of Cavitation. Fluid Mechanics and Its Applications*. Springer, Dordrecht. 2005, vol. 76, pp. 97–130. DOI: 10.1007/1-4020-2233-6.
3. Nesteruk I. *Supercavitation: Advances and Perspectives. A collection dedicated to the 70th jubilee of Yu. N. Savchenko*. Berlin and Heidelberg, Springer-Verlag, 2012. 230 p. DOI: 10.1007/978-3-642-23656-3.
4. Logvinovich G. V., Serebryakov V. V. Pro metody rozrakhunku formy tonkykh osesymetrychnykh kavern [The methods for the calculation of the shape of slender axisymmetric cavities]. *Gidromekhanika* [Hydromechanics]. 1975, issue 32, pp. 47–54.
5. Savchenko Yu., Semenenko V., Savchenko G. Peculiarities of supercavitating vehicles' maneuvering. *International Journal of Fluid Mechanics Research*. 2019, vol. 46, no. 4, pp. 309–323. DOI: 10.1615/InterJFluidMechRes.v46.i4.30.
6. Semenenko V., Moroz V., Kochin V., Naumova O. Dynamics of supercavitating vehicles with cone cavitators. *Mechanics and Advanced Technologies*. 2022, vol. 6, no. 1, pp. 85–95. DOI: 10.20535/2521-1943.2022.6.1.252889.
7. Hirt C. W., Nichols B. D. Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries. *Journal of Computational Physics*. 1981, vol. 39, no. 1, pp. 201–225. DOI: 10.1016/0021-9991(81)90145-5.
8. Koval S. O., Dimitrieva N. F., Voropaiev G. O. Calculation of a Ventilated Cavity in OpenFOAM. In *Proc. Topical Problems of Fluid Mechanics*, ed. D. Šimurda and T. Bodnár. Prague: Institute of Thermomechanics AS CR, 2023, pp. 88–95. DOI: 10.14311/TPFM.2023.013.
9. Dimitrieva N. F., Voropaiev G. O., Fal V. O. Metodyka rozrakhunku utvorenniya parovoyi kaverny za obtichnym tilom [Methodology for calculating the formation of a vapor cavity behind a streamlined body]. *Tezy VII mizhnarodnoyi naukovopraktychnoyi konferentsiyi «Komp'yuterna hidromekhanika»* [Materials of the 7th International Conference "Computational Hydromechanics"]. Kyiv, Instytut Gidromekhaniky NAN Ukrainy Publ., 2020. pp. 27–28.
10. Deshpande S. S., Anumolu L., Trujillo M. F. Evaluating the performance of the two-phase flow solver interFoam *Computational science & discovery*. 2012, vol. 5, no 1, P. 014016. DOI: 10.1088/1749-4699/5/1/014016.
11. Brackbill J. U., Kothe D. B., Zemach C. A continuum method for modeling surface tension. *Journal of Computational Physics*. 1992, vol. 100, no. 2, pp. 335–354. DOI: 10.1016/0021-9991(92)90240-Y.
12. Voropaiev G. O., Korobov V. I., Dimitrieva N. F. Modelyuvannya ventyl'ovanyoi kaverny za obtichnym tilom [Modeling of a ventilated cavity behind a streamlined body]. *Zhurnal obchyslyval'noyi ta prykladnoyi matematyky* [Journal of Computational and Applied Mathematics]. 2021, vol. 135, no. 1, pp. 73–79. DOI: 10.17721/2706-9699.2021.1.09.
13. Voropaiev G. O. V'язке vtyagnennya gazu u ventyliovaniy kaverni zadanoyi formy [Viscous entrainment of gas in a ventilated cavity of the prescribed shape]. *Prykladna gidromekhanika* [Applied Hydromechanics]. 2013, vol. 15(87), no. 1, pp. 10–23.

Надійшла (received) 15.05.2025

Відомості про авторів / Information about authors

Димитрієва Наталія Федорівна – кандидат фізико-математичних наук, учений секретар Інституту гідромеханіки, Національна академія наук України, м. Київ; тел.: (+38044) 371-65-18; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0957-1112>; e-mail: Dimitrieva@nas.gov.ua.

Dimitrieva Natalia Fedorivna – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Scientific Secretary of the Institute of Hydromechanics, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv; tel.: (+38044) 371-65-18; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0957-1112>; e-mail: Dimitrieva@nas.gov.ua.