

С. О. КОВАЛЬ, Г. О. ВОРОПАЄВ, В. І. КОРОБОВ, Н. Ф. ДИМИТРИЄВА

МОДЕЛЮВАННЯ ГАЗОПОДІБНОЇ КАВЕРНИ В ПОТОЦІ РІДИНИ

У роботі розглядається формування вентиляційної каверни в потоці рідини за обтічним тілом, яке являє собою дисковий кавітатор. Чисельне моделювання двофазного середовища базується на методі Volume of Fluid (VOF). Визначальна система рівнянь для суміші вода-повітря складається з рівняння Нав'є-Стокса, неперервності, збереження енергії та дифузії, рівнянь стану (рівняння ідеального газу, наближення Буссінеска для повітря та води відповідно). Ця система замикається моделлю турбулентності Смагоринського (модель великих вихорів). Геометрію створено у відповідності до експериментального кавітатора за допомогою відкритого пакету SALOME. Проведено розрахунки нестационарної задачі двофазної течії двох стисливих середовищ без фазового переходу з використанням чисельної моделі compressibleInterFoam відкритого пакету прикладних програм OpenFOAM. Розрахункова сітка будувалася методом вирізання геометрії з розрахункової області та поетапного згущення біля обтічного тіла утилітою snappyHexMesh. Представлено результати розрахунків формування повітряної порожнини за дисковим кавітатором. Досліджено вплив таких параметрів, як: швидкість вдуву повітря, швидкість потоку води на формування повітряної порожнини, її розмір, форму та стійкість. Запропоновано апроксимаційну залежність, що описує основні параметри системи. Проведено аналіз отриманих результатів та порівняння з експериментальними даними. Наведені перспективи подальших досліджень, пов'язані з розробкою трьохфазної чисельної моделі за допомогою відкритих пакетів прикладних програм для врахування природної кавітації.

Ключові слова: вимушена кавітація, чисельне моделювання, Volume of Fluid, двофазний потік, порожнина, OpenFOAM, SALOME, стисливе середовище, snappyHexMesh.

С. А. КОВАЛЬ, Г. А. ВОРОПАЕВ, В. И. КОРОБОВ, Н. Ф. ДИМИТРИЕВА

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГАЗОБРАЗНОЙ КАВЕРНЫ В ПОТОКЕ ЖИДКОСТИ

В работе рассматривается формирование вентиляруемой каверны в потоке жидкости за обтекаемым телом, которое представляет собой дисковый кавитатор. Численное моделирование двухфазной среды основано на методе Volume of Fluid (VOF). Определяющая система уравнений для смеси вода-воздух состоит из уравнения Навье – Стокса, неразрывности, сохранения энергии и диффузии, уравнений состояния (уравнение идеального газа, приближение Буссинеска). Эта система замыкается моделью турбулентности Смагоринского (модель больших вихрей). Геометрия была построена в соответствии с экспериментальным кавитатором при помощи открытого пакета SALOME. Расчетная сетка строилась методом вырезания геометрии из расчетной области и поэтапного сгущения возле обтекаемого тела утилитой snappyHexMesh. Представлены результаты расчета формирования воздушной полости за дисковым кавитатором. Исследовано влияние таких параметров, как: скорость вдува воздуха, скорость потока воды на формирование воздушной полости, её размер, форму и стойкость. Предложена апроксимационная зависимость, что описывает основные параметры системы. Проведены расчеты нестационарной задачи двухфазного течения двух сжимаемых сред без фазового перехода с использованием численной модели compressibleInterFoam открытого пакета прикладных программ OpenFOAM. Проведен анализ полученных результатов и сравнение с экспериментальными данными. Приведены перспективы последующих исследований, связанных с разработкой трехфазной численной модели при помощи открытых пакетов прикладных программ для учёта природной кавитации.

Ключевые слова: вынужденная кавитация, численное моделирование, Volume of Fluid, двухфазный поток, полость, OpenFOAM, SALOME, сжимаемая среда, snappyHexMesh.

S. O. KOVAL, G. O. VOROPAIEV, V. I. KOROBOV, N. F. DIMITRIEVA

MODELING GASEOUS CAVITY IN FLUID FLOW

The paper considers the formation of a ventilated cavity in a flow of water behind a streamlined body. Numerical modeling of the two-phase flow is based on the Volume of Fluid (VOF) method. The system of equations for the water-air mixture consists of the Navier-Stokes equation, continuity equation, energy conservation equation, and diffusion equation, and the equations of state (ideal gas equation, Boussinesq approximation). This system is closed by the Smagorinsky model of turbulence (the model of large eddies). The geometry was designed in accordance with the experimental cavitator using the SALOME open package. The calculation mesh was built by the method of cutting out the geometry from the calculation domain and step-by-step densification near the streamlined body using the snappyHexMesh utility. The results of the simulation of the formation of the air cavity behind the disk cavitator are presented. The influence of the parameters such as air injection velocity, water flow velocity on the formation of the air cavity, its size and stability is illustrated. An approximation dependence is proposed that describes the main parameters of the system. Numerical simulation of the non-stationary problem of the two-phase flow of two compressible fluids without a phase change was done using the compressibleInterFoam numerical model of the open-source package OpenFOAM. The obtained results were analyzed and compared with experimental data. The perspectives of subsequent studies related to the development of a three-phase numerical model using open source packages of programs for accounting for natural cavitation are illustrated.

Key words: forced cavitation, numerical simulation, Volume of Fluid, two-phase flow, cavity, OpenFOAM, SALOME, compressible flow, snappyHexMesh.

Вступ. В якості способу керування потоком використовується концепція суперкавітації надпорожнини навколо обтічного об'єкту [1, 2]. В зоні зниженого тиску $p < p_{кр}$, коли створюються умови фазового переходу, формується газовий шар між твердою поверхнею і рідиною. Оскільки густина і в'язкість в такому газовому шарі істотно менше, то можна досягти значного зменшення локального опору. Природну кавітацію важко контролювати. Тому для створення і підтримки стабільної порожнини часто примусово вдувається повітря.

Аналіз останніх досліджень. В науковій літературі накопичено великий досвід з вивчення явища кавітації [2, 3]. Однак, однією з головних проблем, які потребують вирішення, залишається проблема стійкості протяжних вентиляційних каверн та їх двофазного замикання. В роботі [4] методами чисельного і фізичного моделювання вивчаються вентиляційні каверни за обтічним тілом із відносно низькою швидкістю течії. Показано, що

© С. О. Коваль, Г. А. Воропаєв, В. І. Коробов, Н. Ф. Димитрієва, 2023

суперкаверна утворюється на малих швидкостях течії рідини при деякому пороговому значенні витрати газу, менше якого вона має нестійку форму і являє собою бульбашкову структуру.

Метою даної роботи є чисельні дослідження процесу формування і розвитку повітряної порожнини, що утворюється в рідині за обтічним тілом. Інтерес представляє аналіз геометричних і фізичних параметрів, що впливають на розмір та стабільність повітряної каверни.

Постановка задачі. Досліджується нестационарна тривимірна задача вдуву газу (повітря) в потік рідини (води). Природною кавітацією нехтується у зв'язку з відсутністю умов фазового переходу в даній постановці. Але на відміну від попередніх чисельних досліджень [4], в даній роботі враховується стисливість середовища та сила тяжіння.

Математична модель. Система рівнянь для суміші двох стисливих неізотермічних середовищ складається з рівняння Нав'є – Стокса, нерозривності, переносу фазової частки і збереження енергії:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho_{eff}\vec{U})}{\partial t} + \vec{U}\vec{\nabla}(\rho_{eff}\vec{U}) &= -\vec{\nabla}p_{total} - \vec{g}\vec{t}(\vec{\nabla}\rho_{eff}) + \vec{\nabla}(\tau_{ij}) + \sigma\kappa(\vec{\nabla}\alpha); \\ \frac{\partial\rho_{eff}}{\partial t} + \vec{\nabla}(\rho_{eff}\vec{U}) &= 0; \\ \frac{\partial\alpha}{\partial t} + \vec{\nabla}(\alpha\vec{U}) &= 0; \\ \frac{\partial(\rho_{eff}e_{total})}{\partial t} + \vec{\nabla}(\rho_{eff}e_{total}\vec{U}) &= \vec{\nabla}(\vec{\nabla}\kappa_{eff}T), \end{aligned} \quad (1)$$

де \vec{U} – швидкість; p_{total} – повний тиск з урахуванням гідростатичного; $\sigma = 0.07$ Н/м – коефіцієнт поверхневого натягу; $\vec{g} = \left(0; -9.81 \frac{M}{c^2}; 0\right)$ – вектор прискорення вільного падіння; $\kappa = \vec{\nabla}\vec{n}_\alpha = \vec{\nabla}\left(\frac{\vec{\nabla}\alpha}{|\vec{\nabla}\alpha|}\right)$ – кривизна поверхні розділу фаз [5]; $e_{total} = c_{veff} T + \frac{|\vec{U}|^2}{2}$ – повна питома енергія; τ_{ij} – тензор в'язких напруг:

$$\tau_{ij} = \mu_{eff} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \mu_{eff} \frac{2}{3} \frac{\partial U_k}{\partial x_k} \delta_{ij}. \quad (2)$$

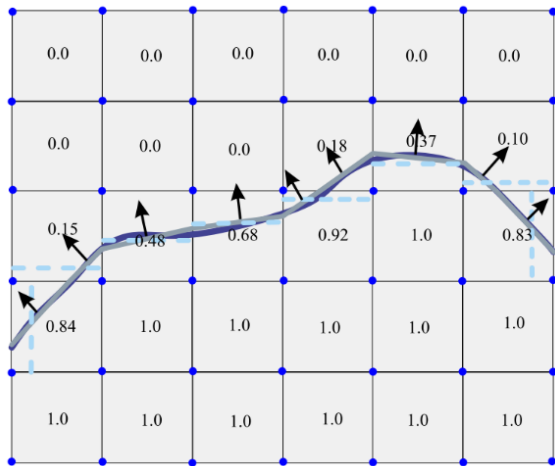


Рис. 1 – Ілюстрація методу VOF.

Для моделювання двофазного потоку використовується метод *Volume of Fluid (VOF)*, який спирається на визначенні індикаторної функції для об'ємної комірки розрахункової сітки [6]. Вводиться функція $\alpha(\vec{x}; t)$, яка приймає значення $\alpha(\vec{x}; t) = 1$, якщо комірка містить виключно рідину та $\alpha(\vec{x}; t) = 0$, якщо в комірці повітря. Комірки зі значенням в діапазоні $\alpha \in [0; 1]$ повинні мати вільну поверхню, як показано на (рис. 1). Таким чином, градієнти фазової частки

$$\alpha = \frac{V_w}{V_w + V_a}$$

зустрічаються лише в зоні зміни фаз. [7].

Ефективні фізичні параметри двофазної суміші визначаються за правилом зваженого середнього:

$$\begin{aligned} k_{eff} &= \alpha k_w + (1 - \alpha) k_a; \quad \mu_{eff} = \alpha \mu_w + (1 - \alpha) \mu_a; \quad \rho_{eff} = \alpha \rho_w + (1 - \alpha) \rho_a; \\ c_{veff} &= \frac{1}{\rho_{eff}} (\alpha \rho_w c_{vw} + (1 - \alpha) \rho_a c_{va}), \end{aligned}$$

де ρ_{eff} – густина; k_{eff} – коефіцієнт теплопровідності; μ_{eff} – коефіцієнт динамічної в'язкості; c_{veff} – питома теплоємність. В якості рівнянь стану було обрано рівняння ідеального газу для повітря:

$$\rho_a = \frac{pM_a}{RT}$$

та гіпотезу Бусінеска для води:

$$\rho_w = \rho_{w0} [1 - \beta(T - T_0)],$$

де $R = 8.3144 \frac{\text{Дж}}{\text{К} \cdot \text{моль}}$ – універсальна газова стала; M_a – молярна маса повітря; $\beta = 210 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$ – коефіцієнт об'ємного розширення води; $\rho_{w0} = 997 \text{ кг/см}^3$ – густина води при температурі $T_0 = 288 \text{ К}$.

Система рівнянь (1) замикається за допомогою моделі турбулентності Смагоринського, що використовує метод великих вихорів. Основа цього методу полягає в тому, що до тензора (2) додається підсітковий тензор в'язких напруг τ_{sgs} [8]:

$$\tau_{sgs} = \rho_{eff} \frac{2}{3} k_{sgs} \delta_{ij} - 2 \rho_{eff} \nu_{sgs} D_{ij}^{dev}.$$

де $D_{ij}^{dev} = D_{ij} - \frac{D_{ii}}{3} \delta_{ij}$, $D_{ij} = \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right)$, $\nu_{sgs} = C_k \Delta \sqrt{k_{sgs}}$ – коефіцієнт турбулентної в'язкості; $k_{sgs} = \left(\frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \right)^2$ – кінетична енергія турбулентності; $a = \frac{C_\epsilon}{\Delta}$, $b = \frac{2}{3} \overline{D_{ij}}$, $c = 2C_k \Delta (D_{ij}^{dev} D_{ij})$, $C_\epsilon = 1.048$,

$C_k = 0.094$ – модельні константи. Характерний розмір комірки $\Delta = \sqrt[3]{V_{cell}}$ визначається роздільною здатністю розрахункової сітки, де V_{cell} – об'єм комірки.

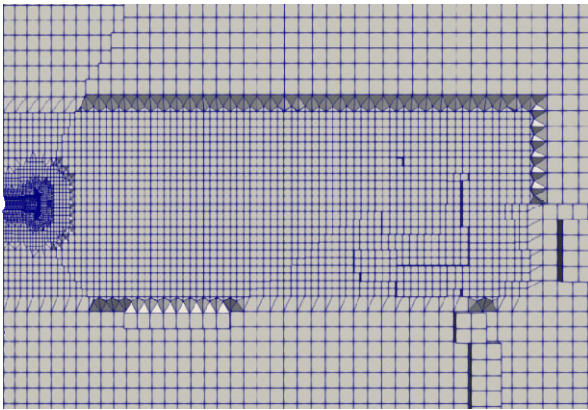


Рис. 2 – Розрахункова сітка.

Розрахункова сітка. Розрахункова область представляє собою паралелепіпед розмірами $2000 \times 440 \times 440 \text{ мм}$, в якому розташовано обтічне тіло – *дисковий кавітатор* діаметром $32,4 \text{ мм}$. Геометрія кавітатора будувалася у відкритому графічному пакеті SALOME. Наступним кроком було вирізано обтічне тіло з розрахункової області та побудовано сітку методом поетапного згущення за допомогою утиліти snappyHexMesh, як зображено на рис. 2. Перевагою утиліти snappyHexMesh є те, що сітка будується переважно з гексадральних елементів ($n_{hex} \approx 97\%$). Це позитивно впливає на збіжність розв'язку. Інші 3% мають призматичну або багатогранну форму. Загальна кількість комірок складає $N_{cells} \approx 150000$. Мінімальний об'єм комірок біля поверхні кавітатора – $V_{cellmin} \approx 1 \text{ мм}^3$.

Результати розрахунків. Було проведено розрахунки формування повітряної порожнини за дисковим кавітатором з використаннями вище представленої математичної моделі, яку реалізовано в чисельній моделі compressibleInterFoam відкритого пакету OpenFOAM.

Чисельні експерименти показали, що в сліді за тілом утворюється стійка газоподібна каверна, товщина якої визначається діаметром кавітатора, що узгоджується з [1, 4]. Формування зсувного шару на поверхні каверни, в першу чергу, залежить від фізичних властивостей газу, а також швидкості потоку і довжини обводу каверни, на якій цей шар формується.

З початку руху повітряний струмінь завдяки умові прилипання розтікається по задній стінці, заповнюючи весь простір за обтічним тілом, як можна бачити на рис. 3, а. Повітряна порожнина досягає діаметра кавітатора і витягується вздовж напрямку основної течії (рис. 3, б). В полі сили тяжіння втрачається стійкість, що призводить до спливання порожнини (рис. 3, в) і формування двофазного сліду, який представляє собою пару поздовжніх вихорів (рис. 3, г).

Форма каверни і характер її формування узгоджуються з результатами математичного і фізичного моделювання [4]. Детальне вивчення механізму в'язкого залучення газу в кавернах великого подовження показало, що розвинену каверну великого подовження за малих чисел кавітації умовно можна розділити на *три зони* [9]. *Перша зона* характеризується постійним тиском і досить точно визначається межею молекулярного шару розділу газ-рідина і тонким шаром в'язкого залучення газу каверни. *Друга зона* характеризується кінцевою товщиною шару в'язкого залучення, який наповнюється дрібними краплями води не тільки за рахунок в'язкої дифузії, але і в результаті динамічної взаємодії на межі розділу фаз двох середовищ, який деформується незначною мірою, а також газу, що надходить за рахунок необхідної вентиляції каверни для підтримання сталості тиску. *Третя зона* характеризується товстим двофазним шаром змішування, що досягає осі каверни, який замикає каверну і формує двофазний слід за каверною.

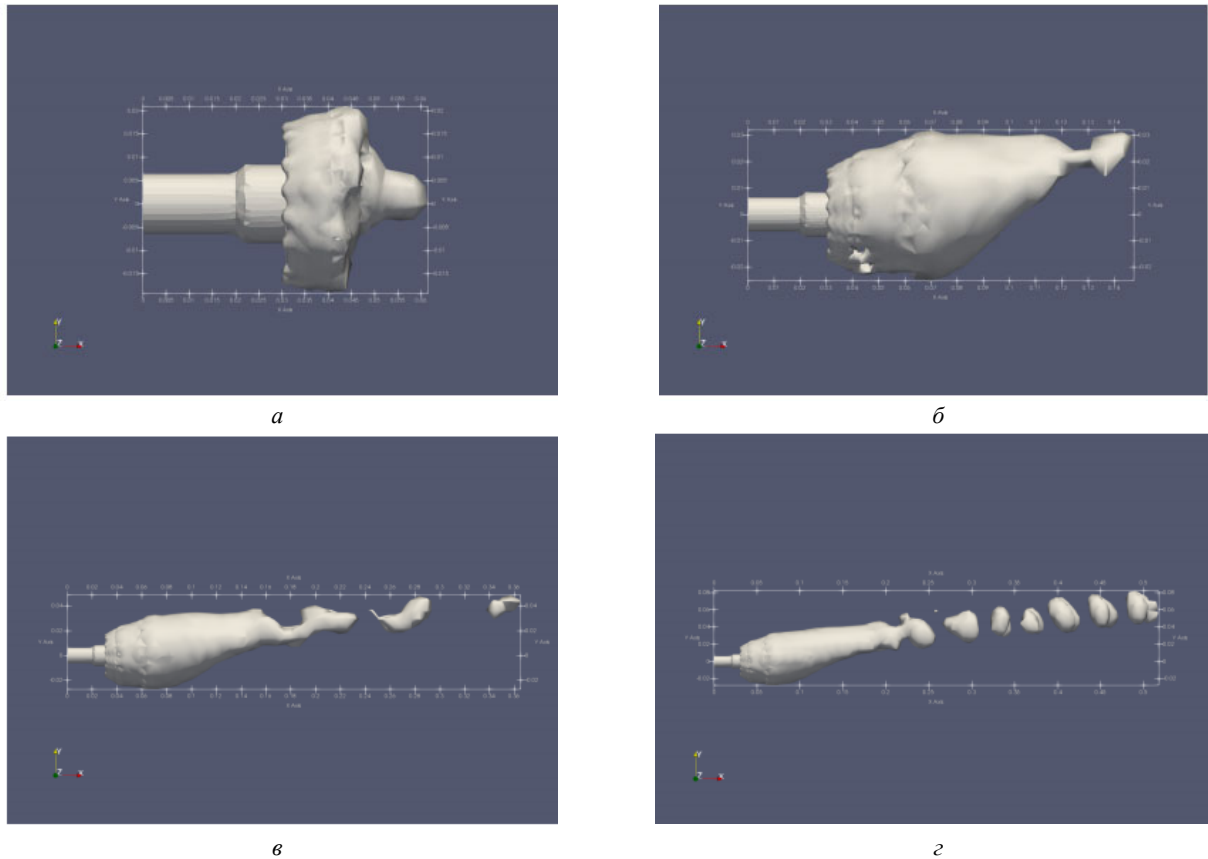


Рис. 3 – Еволюція фазової поверхні: $a - t = 0.02\text{c}$; $b - t = 0.14\text{c}$; $в - t = 0.32\text{c}$; $г - t = 0.63\text{c}$.

Частина об'єму газу каверни втягується в рух навколишньої рідини і зноситься потоком в корму каверни, формується поворотний струмінь, утворюючи циркуляційну вихрову зону (рис. 4). Ця структура течії газу в каверні можлива, коли товщина внутрішнього примежового шару залишається значно менше радіуса каверни і немає обміну масою через поверхню корми каверни. Коли ж величина товщини примежового шару досягає радіуса каверни, для збереження тиску в каверні необхідно даний об'єм компенсувати, що робиться примусово в вентильованій каверні для підтримки її відповідної форми і подовження.

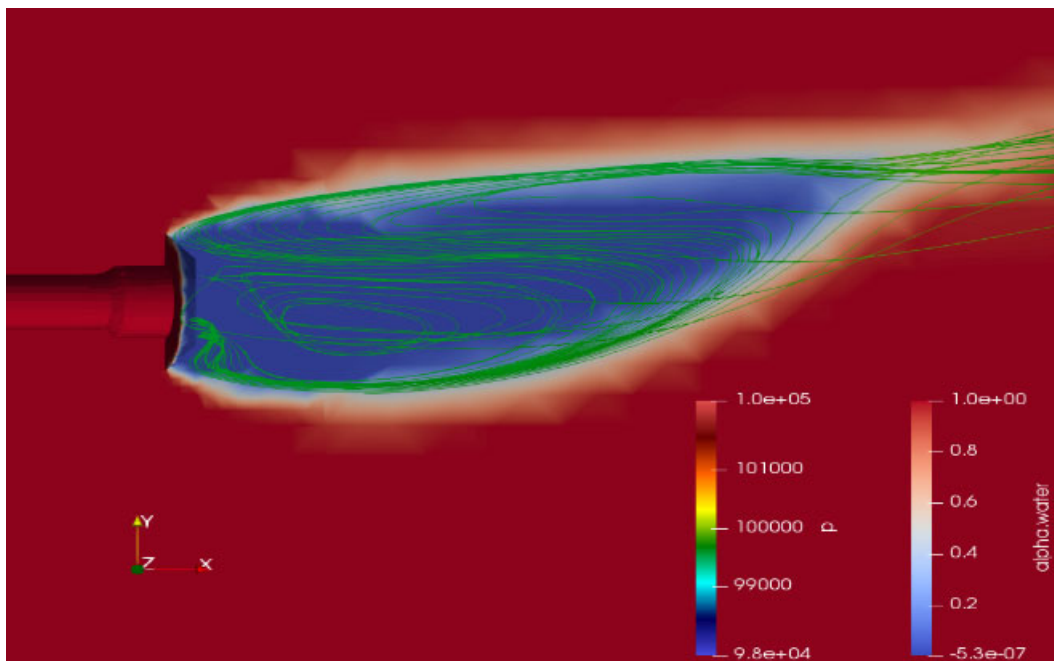
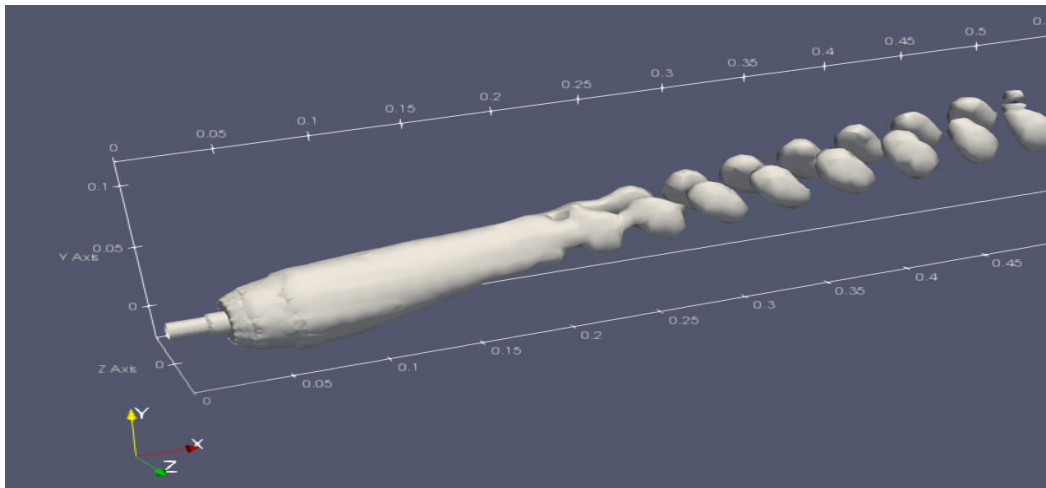


Рис. 4 – Вихровий рух всередині каверни.



а



б

Рис. 5 – Візуалізація вентиляваної каверни: а – результати розрахунків; б – експериментальні дані.

Порівняння з експериментальними даними. Експерименти проводилися в гідродинамічній трубі в Інституті гідромеханіки НАН України з закритою робочою частиною, яка має квадратний поперечний переріз розміром $0,4 \times 0,4$ м і довжину 1,8 м. Кавітатор встановлювався на порожнистій державці посередині робочій ділянці гідродинамічної труби, піддув каверни здійснювався повітрям від компресора. Величина витрати визначалася за перепадом тиску в *трубі Вентурі*, яка включена в магістраль наддуву, за допомогою диференціального датчика тиску. Швидкість потоку U_w визначалася за величиною швидкісного напору в робочій ділянці гідродинамічної труби. Геометричні параметри каверни реєструвалися за допомогою цифрової фотокамери одномоментно з реєстрацією параметрів тиску.

На рис. 5 представлено миттєві картини візуалізації повітряної порожнини в потоці води. Результати чисельних розрахунків зображено у вигляді ізоповерхні фазової частки $\alpha \approx 0.8$, що імітує поверхню розділу фаз (рис. 5, а). Експериментальні дані представлено у вигляді фотографії (рис. 5, б).

В обох випадках можна бачити основні зони каверни:

- 1) стійка повітряна частина, що видовжена вздовж основного потоку;
- 2) нестійка газо-рідинна суміш, що замикає каверну, яка викривлюється під впливом гравітації;
- 3) пара «рукавів», які обертаються за каверною, повторюючи вихровий рух рідини в сліді, та поступово спливають вгору.

Основна відмінність структури отриманих картин візуалізації повітряної порожнини спостерігається в хвостовій вихровій зоні. На експериментальних фотографіях чітко видно пару суцільних закручених рукавів (рис. 5, б). Результати розрахунків показали в сліді каверни відокремлені бульбашки, що в першу чергу свідчить про недосконалість розрахункової сітки далеко від тіла та методу візуалізації. Вплив методів дискретизації та розв'язку визначальної системи рівнянь, а також вибір адекватної математичної моделі, яка включає і модель турбулентності, потребує подальших більш детальних досліджень.

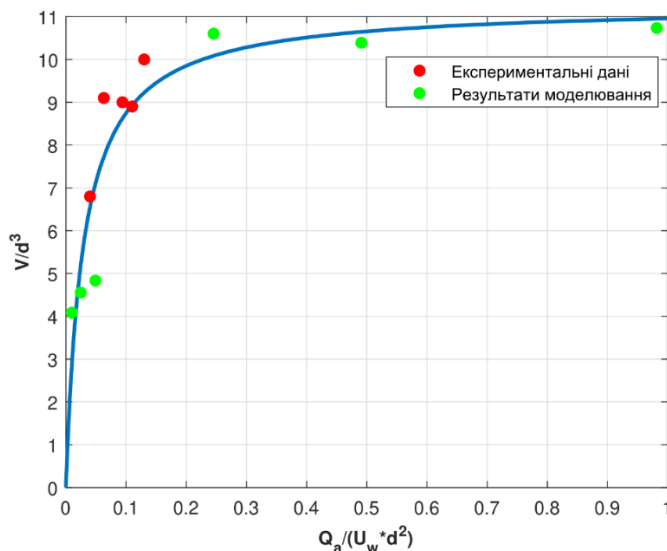


Рис. 6 – Графік залежності об'єму повітряної порожнини від динамічних параметрів потоку.

де $P_1 = 11.27$, $P_2 = 0.03$ – константи апроксимації.

Таким чином, з отриманих оцінок впливає максимально можливе значення об'єму вентилярованої каверни $V \approx 10.9d^3$ за швидкості основного потоку води $U_w = 1.6$ м/с. Подальше збільшення витрати повітря через вентиляційний отвір не призводить до збільшення каверни, а залишки повітря виходять через «рукави» в сліді.

Перспективи подальших досліджень. Автори вважають перспективними шляхи дослідження, що пов'язані з розробкою математичної моделі трифазної течії – повітря-вода-водяна пара, що враховує фазовий перехід між водою і водяною парою, тобто природну кавітацію.

Висновки. В рамках запропонованої методики чисельного моделювання тривимірних нестационарних стисливих двофазних течій було досліджено процес утворення вентилярованої каверни, вплив параметрів вдуву повітря та швидкості потоку води на процес формування повітряної порожнини та її розміри. Результати розрахунків узгоджуються з теоретичними і експериментальними даними. В структурі розвиненої каверни відокремлено три основні зони: стабільна повітряна порожнина, нестійка газорідина суміш і вихровий слід. Оцінки залежності розміру повітряної порожнини від параметрів течії виявили, що розмір порожнини досягає свого порогового значення. Подальше збільшення витрати повітря через вентиляційний отвір не призводить до збільшення порожнини.

Список літератури

1. Nesteruk I. Supercavitation: Advances and Perspectives. A collection dedicated to the 70th jubilee of Yu. N. Savchenko. – Springer-Verlag, 2012. – 230 p.
2. Ahn B.-K. An experimental investigation of artificial supercavitation generated by air injection behind disk-shaped cavitators // International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering. – 2017. – Vol. 9. – Issue 2. – P. 227 – 237. <https://doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2016.10.006>
3. Carpenter, Jitendra, Badve, Mandar, Rajoriya, Sunil, George, Suja, Saharan, Virendra Kumar and Pandit, Aniruddha B. Hydrodynamic cavitation: an emerging technology for the intensification of various chemical and physical processes in a chemical process industry // Reviews in Chemical Engineering. – 2017. – Vol. 33. – No. 5. – pp. 433-468. <https://doi.org/10.1515/revce-2016-0032>.
4. Воронаев Г. О., Коробов В. І., Димитрієва Н. Ф. Моделирование вентиляционной каверны за обтічним тілом // Журнал обчислювальної та прикладної математики. – 2021. – Т. 8. – № 1. – С. 73 – 78.
5. Scheufler H., Roenby J. TwoPhaseFlow: An OpenFOAM based framework for development of two-phase flow solvers. Available at: <https://arxiv.org/pdf/2103.00870.pdf>. Accessed: 20 March 2023.
6. Haider J. Numerical Modelling of Evaporation and Condensation Phenomena. Тезис на здобуття ступеня магістру. Штутгартський Університет, Німеччина и Політехнічний університет Каталонії, Іспнія, 2011-2013
7. Savio A., Cianferra M., Armenio V. Analysis of Performance of Cavitation Models with Analytically Calculated Coefficients // Energies. – 2021. – vol. 14. – issue 19, 6425. <https://doi.org/10.3390/en14196425>.
8. Волков К. Н., Емельянов В. Н. Моделирование крупных вихрей в расчетах турбулентных течений / Под ред. Ярунин В. С. – 1 изд. // ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 368 с.
9. Воронаев Г. А. Вязкое вовлечение газа в вентилируемой каверне заданной формы // Прикладная гидромеханика. – 2013. – Т. 15. – № 1. – С. 10 – 23.
10. Koval S. O., Dimitrieva N. F., Voropaiev G. O. Calculation of a Ventilated Cavity in OpenFOAM // In Proc. Topical Problems of Fluid Mechanics. – Prague, 2023. – P. 88 – 95. <https://doi.org/10.14311/TPFM.2023.013>.

References (transliterated)

1. Nesteruk I. Supercavitation: Advances and Perspectives. A collection dedicated to the 70th jubilee of Yu. N. Savchenko. Springer-Verlag, 2012. 230 p.

2. Ahn B.-K. An experimental investigation of artificial supercavitation generated by air injection behind disk-shaped cavitators. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*. 2017, vol. 9, issue 2, pp. 227–237. <https://doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2016.10.006>
3. Carpenter, Jitendra, Badve, Mandar, Rajoriya, Sunil, George, Suja, Saharan, Virendra Kumar and Pandit, Aniruddha B. Hydrodynamic cavitation: an emerging technology for the intensification of various chemical and physical processes in a chemical process industry. *Reviews in Chemical Engineering*. 2017, vol. 33, no. 5, pp. 433-468. <https://doi.org/10.1515/revce-2016-0032>.
4. Voropaev G. O., Korobov V. I., Dimitrieva N. F. Modelyuvanya ventylyovanoi 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. 8, no. 1, pp. 73–78.
5. Scheuflera H., Roenbyb J. TwoPhaseFlow: An OpenFOAM based framework for development of two-phase flow solvers. Available at: <https://arxiv.org/pdf/2103.00870.pdf>. Accessed: 20 March 2023.
6. Haider J. *Numerical Modelling of Evaporation and Condensation Phenomena*. Master of Science Thesis. Universität Stuttgart, Germany and UPC BarcelonaTech, Spain, 2011-2013.
7. Savio A., Cianferra M., Armenio V. Analysis of Performance of Cavitation Models with Analytically Calculated Coefficients. *Energies*. 2021, vol. 14, issue 19, 6425. <https://doi.org/10.3390/en14196425>.
8. Volkov K. N., Emelyanov V. *Modelirovanie krupnykh vikhrey v raschetakh turbulentnykh techeniy* [Modeling of large eddies in turbulent flow]. Ed. Yarin V. 1-st ed. PHYSMATHLIT Publ., 2008. 368 p.
9. Voropaev G. O. Vyazkoe vovlechenie gaza v ventiliruemoy kaverne zadannoy formy [Viscous entrainment of gas in a ventilated cavity of the prescribed shape]. *Priladnaya gydromekhanika* [Applied hydromechanics]. 2013, vol. 15, no. 1, p. 10–23.
10. Koval S. O., Dimitrieva N. F., Voropaev G. O. Calculation of a Ventilating Cavity in OpenFOAM. In *Proc. Topical Problems of Fluid Mechanics*. Prague, 2023. p. 88–95. <https://doi.org/10.14311/TPFM.2023.013>.

Надійшла (received) 22.03.2023

Відомості про авторів / Сведения об авторах / Information about authors

Коваль Сергій Олександрович – студент навчально-наукового фізико-технічного інституту, Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського, м. Київ; тел.: (096) 979-78-45; e-mail: koval.sergiy-ipt@lil.kpi.ua.

Коваль Сергей Александрович – студент учебно-научного физико-технического института, Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского, г. Киев; тел.: (096) 979-78-45; e-mail: koval.sergiy-ipt@lil.kpi.ua.

Koval Serhii Oleksandrovich – student of Institute of Physics and Technology, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv; tel.: (096) 979-78-45; e-mail: koval.sergiy-ipt@lil.kpi.ua.

Воропаєв Геннадій Олександрович – член-кореспондент Національної академії наук України, доктор фізико-математичних наук, професор, директор Інституту гідромеханіки, Національна академія наук України, м. Київ; тел.: (044) 371-65-17; e-mail: Voropaiev@nas.gov.ua.

Воропаев Геннадий Александрович – член-кореспондент Национальной академии наук Украины, доктор физико-математических наук, профессор, директор Института гидромеханики, Национальная академия наук Украины, г. Киев; тел.: (044) 371-65-17; e-mail: Voropaiev@nas.gov.ua.

Voropaiev Gennadii Oleksandrovich – Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Ukraine, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, director of the Institute of Hydromechanics, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv; tel.: (044) 371-65-17; e-mail: Voropaiev@nas.gov.ua.

Коробов Віталій Ілліч – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, старший науковий співробітник Інституту гідромеханіки, Національна академія наук України, м. Київ; тел.: (044) 371-65-18; e-mail: v_korobov@ukr.net.

Коробов Виталий Ильич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, старший научный сотрудник Института гидромеханики, Национальная академия наук Украины, г. Киев; тел.: (044) 371-65-18; e-mail: v_korobov@ukr.net.

Korobov Vitalii Illich – Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Senior Researcher of the Institute of Hydromechanics, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv; tel.: (044) 371-65-18; e-mail: v_korobov@ukr.net.

Димитрієва Наталія Федорівна – кандидат фізико-математичних наук, вчений секретар Інституту гідромеханіки, Національна академія наук України, м. Київ; тел.: (044) 371-65-18; e-mail: Dimitrieva@nas.gov.ua.

Димитриева Наталья Федоровна – кандидат физико-математических наук, ученый секретарь Института гидромеханики, Национальная академия наук Украины, г. Киев; тел.: (044) 371-65-18; e-mail: Dimitrieva@nas.gov.ua.

Dimitrieva Natalia Fedorovna – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, scientific secretary of the Institute of Hydromechanics, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv; tel.: (044) 371-65-18; e-mail: Dimitrieva@nas.gov.ua.