

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ КАВІТАЦІЇ ЗА КОНУСОПОДІБНИМ ТІЛОМ

В. О. Фаль¹, Н. Ф. Димитрієва^{1, 2}

¹Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
Фізико-технічний інститут

²Інститут гідромеханіки Національної академії наук України

Анотація

У роботі розглядається формування каверни за обтічним тілом за режиму видуву повітря у водний потік у гравітаційному полі. Математичне моделювання базується на методі Volume of Fluid (VOF). Визначальна система рівнянь для суміші вода-повітря складається з рівняння Нав'є-Стокса, неперервності та дифузії об'ємної частки рідкої фази. На основі відкритого програмного забезпечення OpenFOAM виконано чисельне моделювання двофазної течії двох ізотермічних нестисливих середовищ без фазового переходу. Представлено результати розрахунків формування повітряної каверни за конусоподібним тілом. Досліджено вплив параметрів продувки газу на формування повітряної порожнини, розмір, форму та стійкість.

Ключові слова: чисельне моделювання, кавітація, двофазна течія, Volume of Fluid

Вступ

Явище кавітації носить локальний характер і виникає лише там, де існують особливі умови фазового переходу. Таким станом може бути, наприклад, локальне зниження тиску в рідині зі збільшенням швидкості за обтічним тілом або в трубі зі змінним діаметром. За своєї природою дане явище призводить до низки проблем, пов'язаних з руйнуванням механізмів та устаткування. З ростом потужності механізмів та швидкості обертання їх рухомих частин збільшується руйнуючий ефект кавітації [1]. Потоки рідини в трубах та каналах також утворюють пошкодження стінок призводячи до неполадок, наприклад, в системах водопостачання або подачі топлива до дизельного двигуна [2].

Проектування вільних від кавітаційного впливу систем є складною інженерною та, часто, економічно не вигідною задачею. Захисне покриття чи додатковий механізм стримування надлишкової кавітації може виявитися економічно недоцільним, або нашкодити ефективності гідравлічної системи [3].

Однак, руйнуюча сила кавітації знаходить своє використання в інших сферах індустрії: клінічній та біомедицині [4], харчовій промисловості [5], акустичній хімії, механічній, морській та гідравлічній інженерії. Дроблення каменів в нирках, або ж плавлення легких сплавів ще є тестовими, але багатообіцяючими методами використання явища.

Проте, дослідження в сфері утворення та контролювання кавітаційного потоку розраховані на перспективу довгострокового використання та надійності систем, навантажених на які з часом буде лише збільшуватись. Одним із методів керування потоками є технологія створення протяжних вентильованих су-

перкаверн [6] навколо рухомих у водному середовищі об'єктів. Однак зі збільшенням швидкості і розмірів рухомих об'єктів однієї з головних проблем кавітаційного обтікання тіл, які потребують вирішення, стає проблема стійкості протяжних вентильованих каверн і їх двофазного замикання [7].

Розвиток методів комп'ютерного моделювання фізичних явищ дозволив прискорити дослідження та покращити дизайн гідромеханічних систем, тим самим зменшивши руйнівні наслідки, пов'язані з явищем кавітації [8], [9].

Отже, метою даної роботи є чисельне моделювання процесу кавітації за конусоподібним тілом та дослідження впливу параметрів кавітатора на неї.

1. Математична модель

Досліджується нестационарна тривимірна течія навколо конусоподібного тіла за режиму видуву повітря в потік рідини з врахуванням сили тяжіння.

Чисельне моделювання методом скінченних об'ємів було виконано в середовищі відкритого програмного забезпечення OpenFOAM. В якості математичної моделі поставленої задачі вибрана система, яка складається з рівняння Нав'є-Стокса для двох нестисливих, ізотермічних середовищ, які не змішуються та рівняння нерозривності:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\tau_{ij} + \tau_{ji}) + \rho g_i + f_{\sigma i}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0. \quad (2)$$

Тут u_i – компонента швидкості, де $i = x, y, z, p$ – тиск, τ – тензор напруг, що включає в'язку та турбулентну складові, $f_{\sigma i}$ – сила поверхневого натягу, g_i – компонента прискорення вільного падіння, ρ – ефективна густина, яка визначається співвідношенням:

$$\rho = \alpha \rho_1 + (1 - \alpha) \rho_2. \quad (3)$$

$\alpha(x_i, t)$ – індикаторна функція, яка вводиться для розрахунку методом VOF і описує об'ємну фазову частку рідини для кожної комірки розрахункової сітки [10]. Точка, яка містить рідину приймає значення 1, або ж 0 за її відсутності. На межі розділу фаз α приймає значення між 0 та 1 й описує вільну поверхню. Градієнт фазової частки зустрічається лише в зоні зміни фаз. Таким чином, два середовища, що не змішуються, вважаються ефективною рідиною по всьому домену. Перенос фазової частки визначається рівнянням:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \frac{\partial(\alpha u_i)}{\partial x_i} = 0. \quad (4)$$

Сила поверхневого натягу $f_{\sigma i}$ розраховується за рівнянням [11]:

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

де σ – коефіцієнт поверхневого натягу, κ – кривизна поверхні розділу фаз.

Система рівнянь (1-3) замикається моделлю турбулентності Смагоринського, що використовує метод великих вихорів. В даній моделі в'язкість турбулентності:

$$\nu_t = k^{0.5} C_k \Delta, \quad (5)$$

де кінетична енергія турбулентності k знаходиться з квадратичного рівняння $ak^2 + bk + c = 0$ за спрощеною схемою для нестисливого потоку: $a = \frac{C_e}{\Delta}$, $b = \frac{2}{3} \sum D_{ii} = 0$, $c = C_k \Delta \sum D_{ij}^2$. D_{ij} – тензор швидкості деформацій:

$$D_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), \quad (6)$$

C_e та C_k константи моделі, а Δ характерний розмір розрахункової сітки, який розраховується методом ван Дрієста.

Розрахункова область представляє собою прямокутний канал з розмірами $0.5 \times 0.15 \times 0.15$ м, всередині якого розташовано кавітатор у вигляді пустопорожнинного зрізаного конусу, як показано на рис. 1. Також розрахунки проводилися для кавітатора з коефіцієнтом масштабування $k_{scale} = \frac{1}{2}$. Геометрія кавітатора з отвором вдуву повітря будувалася в програмному забезпеченні SALOME.

Наступним кроком кавітатор було вбудовано в геометрію розрахункової області та побудовано розрахункову сітку за допомогою утиліти **snappyHexMesh** пакету **OpenFOAM**. Її перевагою є те, що вихідна сітка в більшості побудована з гексагедральних елементів зі співвідношенням сторін близько 1, що за-

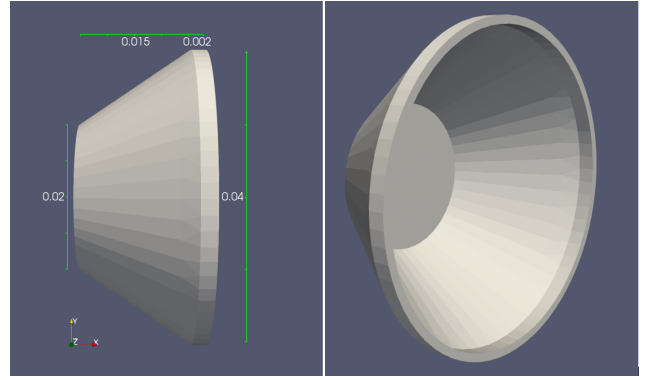


Рис. 1. Геометрія кавітатора (розміри вказано в метрах)

безпечує кращу збіжність розв'язку [12]. Результуюча сітка складається з 96% гексагедральних клітин з мінімальним характерним розміром клітини $L_{min} \approx 1.2 \cdot 10^{-6}$ м поблизу обтічного тіла.

2. Результати та обговорення

В результаті чисельних розрахунків було проведено аналіз параметрів, що впливають на формування та розвиток повітряної порожнини за обтічним тілом, її розмір, форму та стабільність. Швидкість зовнішнього потоку рідини була фіксованою, $U_0 = 1,0$ м/с. Об'ємна витрата газу через отвір $Q = U_c S$ змінювалася за рахунок зміни швидкості вдуву U_c та площі отвору S (табл. 2).

Рис. 2. Параметри вдуву повітря

№ з/п	Діаметр отвору d , м	Швидкість вдуву повітря U_c , м/с	Об'ємна витрата повітря Q , м ³ /с·10 ⁻⁹
1	0.01	2	200
2	0.02	2	800
3	0.01	8	800

Результати чисельних розрахунків показали, що в сліді за обтічним тілом утворюється стійка газоподібна каверна (рис. 2, 3). Початковий діаметр вентильованої каверни повністю відповідає діаметру вхідного отвору кавітатора, що узгоджується з даними [6].

В штучно вентильованих кавернах спостерігається невелике падіння тиску. На рис. 3, 4, В представлено миттєві розподіли тиску в сліді за обтічним тілом, що відповідають режимам 1 і 2 Таблиці 2. Видно, що в сліді за кавітатором тиск слабо змінюється, крім областей зміни фаз. Детальний аналіз показав, що при зміні фаз спостерігається падіння тиску до 250 Па. Такої різниці недостатньо для повного колапсу бульбашки, адже локальне падіння тиску урівноважується постійним вдувом. Втім, спостерігаються флуктуації поверхні розділу фаз, що призводить до тимчасових змін форми каверни.

Інтерес представляє процес формування в потоці рідини газоподібної каверни в сліді за обтічним тілом, який показано на рис. 5-7 для режимів 1-3 згідно до таблиці 2.

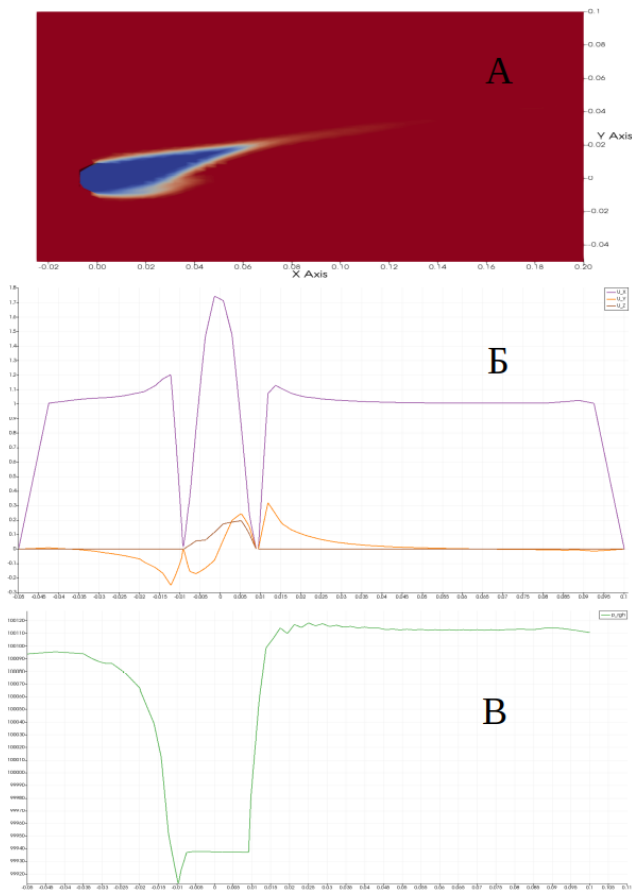


Рис. 3. Миттєва картина двофазної течії ($U_c = 2.0$ м/с, $d = 0.01$ м, $t = 0.4$ с): А – фазова частка α в перерізі $z = 0$: червоний колір – рідка фаза, синій – газоподібна. Б – графік залежності компонент швидкості u_i за кавітатором від поперечної координати y . В – графік залежності тиску p за кавітатором від поперечної координати y .

На початку руху повітря, що видувається з кавітатора, утворює стійку бульбашку, розміри якої залежать від параметрів вдуву (рис.5-7, А). Дана бульбашка за рахунок різниці швидкостей основного потоку рідини і вдуву повітря роздувається та відривається від основного тіла каверни, як показано на рис. 7, Б, В. Після відриву первинної бульбашки повітряна каверна сплющується під дією сили тяжіння та рухається вгору, досягаючи свого максимального об'єму, за якого може залишатися стабільною (рис. 5-7, Е). Надлишки повітря рухаються по двом рукавам, утворюючи пару поздовжніх вихорів (рис. 5-7, Г, Д). Досягається стабілізація каверни після чого відбуваються лише флуктуації граничної межі каверни. Її розвиток в цілому є квазістаціонарним і симетричним відносно площини XY . Таким чином, стає досить легко передбачити еволюцію каверни від початку вдуву до її стабілізації.

Також, було оцінено розміри каверни після стабілізації та наведено в табл. 1.

Висновки

Досліджено двофазний потік та явище кавітації за конусоподібним тілом за режиму вдуву з нього пові-

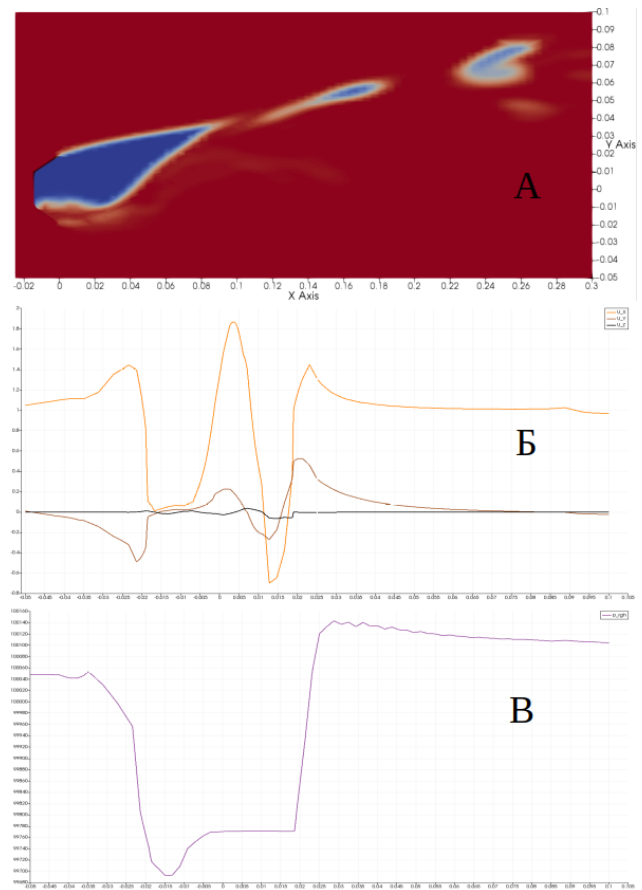


Рис. 4. Миттєва картина двофазної течії ($U_c = 2.0$ м/с, $d = 0.02$ м, $t = 0.4$ с): А – фазова частка α в перерізі $z = 0$: червоний колір – рідка фаза, синій – газоподібна. Б – графік залежності компонент швидкості u_i за кавітатором від поперечної координати y . В – графік залежності тиску p за кавітатором від поперечної координати y .

Табл. 1. Розміри стабілізованої каверни

№ з/п	Об'ємна витрата повітря Q , $\text{м}^3/\text{с} \cdot 10^{-9}$	Довжина L , м	Об'єм V , $\text{м}^3 \cdot 10^{-5}$
1	200	0.062	3.8
2	800	0.085	20.2
3	800	0.07	4.4

тря з урахуванням дії гравітації. Моделювання було проведено з використанням пакету OpenFOAM методом Volume-of-Fluid. Проведено аналіз геометричних і динамічних параметрів, які впливають на процес формування каверни. Показано, що сила тяжіння негативно впливає на розмір і стійкість повітряної порожнини, утворюючи пару поздовжніх вихорів в сліді за основним тілом каверни. Збільшення швидкості вдуву сприяло більш швидкій стабілізації каверни та незначному збільшенню її розмірів. Це може бути пов'язано з більшою об'ємною витратою газу під час вдуву та діаметром каверни, який відповідає діаметру вихідного отвору.

Дана модель може бути покращена за рахунок локальних згущень розрахункової сітки, які відповідають геометрії утвореної каверни. Це потрібно

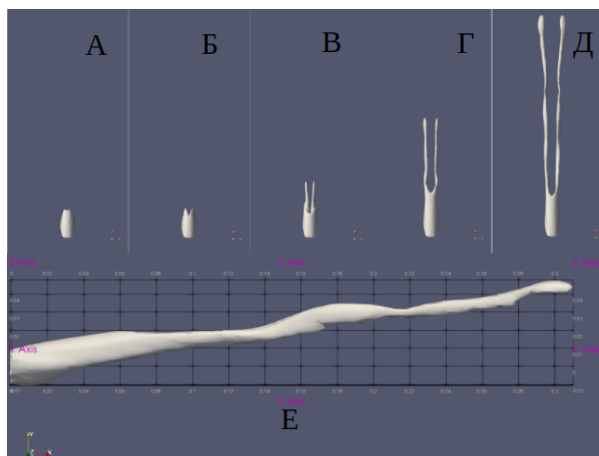


Рис. 5. Еволюція міжфазної поверхні ($U_c = 2.0$ м/с, $d = 0.01$ м). А – $t = 0.085$ с. Б – $t = 0.09$ с. В – $t = 0.15$ с. Г – $t = 0.265$ с. Д – $t = 0.4$ с. Е – $t = 0.4$ с.

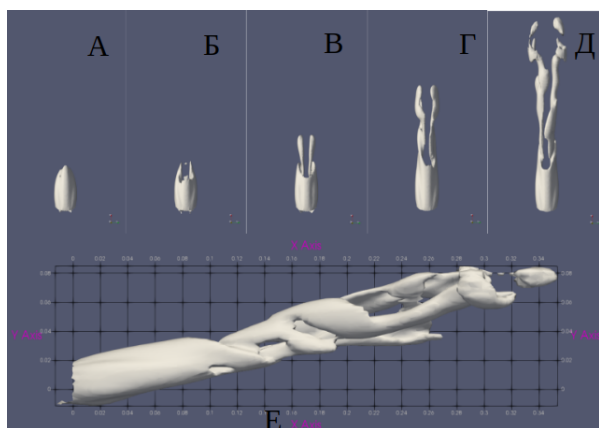


Рис. 6. Еволюція міжфазної поверхні ($U_c = 2.0$ м/с, $d = 0.02$ м). А – $t = 0.12$ с. Б – $t = 0.14$ с. В – $t = 0.2$ с. Г – $t = 0.3$ с. Д – $t = 0.4$ с. Е – $t = 0.4$ с.

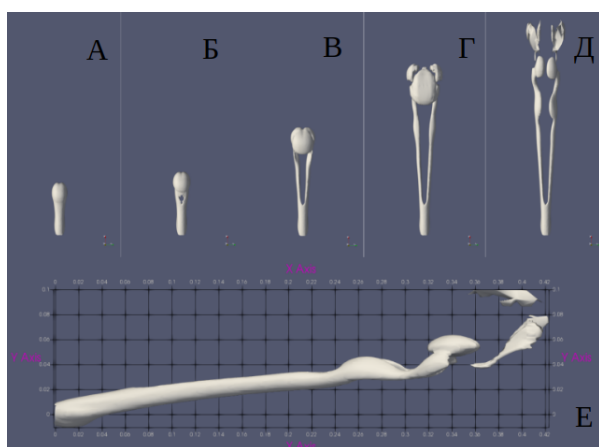


Рис. 7. Еволюція міжфазної поверхні ($U_c = 8.0$ м/с, $d = 0.01$ м). А – $t = 0.1$ с. Б – $t = 0.12$ с. В – $t = 0.2$ с. Г – $t = 0.3$ с. Д – $t = 0.4$ с. Е – $t = 0.4$ с.

для більш точного врахування явищ, масштаб яких є меншим за характеристичний розмір сітки та покращення якості моделювання міжфазової поверхні.

Перелік використаних джерел

1. Sreedhart B. K., Albert S. K., B. Pandit A. Cavitation damage: Theory and measurements – A review // *Wear*. — 2017. — Vol. 372-373. — P. 177–196.
2. Osman A. Failure of a diesel engine injector nozzle by cavitation damage // *Engineering Failure Analysis*. — 2006. — 10. — Vol. 13. — P. 1126–1133.
3. Tullis J.P. *Hydraulics of pipelines*. — 1989. — 1. — P. 18–33.
4. Brennen C.E. *Cavitation in medicine* // *Interface Focus*. — 2015. — P. 1–5.
5. Beer-brewing powered by controlled hydrodynamic cavitation: Theory and real-scale experiments / L. Albanese, R. Ciriminna, F. Meneguzzo, M. Pagliaro // *Journal of Cleaner Production*. — 2016. — P. 4–15.
6. Vlasenko Yu. D., Savchenko G. Yu. Study of the Parameters of a Ventilated Supercavity Closed on a Cylindrical Body // *Supercavitation. Advances and Perspectives*. — 2012. — Vol. 1. — P. 201–214.
7. Гідродинаміка та тепло-масообмін багатфазних пристінних течій: Звіт НДР (проміжний) / ІГМ НАНУ; кер. Г.О. Воропаєв. – Київ. – 2018. – С. 64с.
8. Piroz Z. Simulation of Cavitation Water Flows // *Mathematical Problems in Engineering*. — 2015. — Vol. 20150. — P. 1–16.
9. Димитрієва Н.Ф., Воропаєв Г.О., Фаль В.О. Методика розрахунку утвореної парової каверни за обтічним тілом // *Комп'ютерна гідромеханіка: Тези VII міжнар. наук.-практ. конф. (Київ, 29-30 вересня 2020 р.)*. – Київ : ІГМ НАНУ. — 2020. — С. 27–28.
10. Hirt C.W., Nichols B.D. Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries // *Journal of Computational Physics*. — 1981. — Vol. Volume 39, Issue 1. — P. 201–225.
11. Heyns J.A., Oxtoby O.F. Modelling surface tension dominated multiphase flows using the VOF approach // *6th European Conference on Computational Fluid Dynamics*. — 2014. — P. 2–5.
12. Baker T. J. Mesh generation: Art or science? // *Progress in Aerospace Sciences*. — 2005. — Vol. 41, no. 1. — P. 29–63.