УДК 532.5
DOI https://doi.org/10.15589/znp2026.3(506).14

HYDRODYNAMIC MODEL OF THE FLUID VELOCITY PROFILE AT THE INTERFACE WITH THE CAVITY

ГІДРОДИНАМІЧНА МОДЕЛЬ ПРОФІЛЮ ШВИДКОСТІ РІДИНИ НА МЕЖІ З КАВЕРНОЮ

Valerii Yu. Scherbyna
cpsm.adm@kpi.ua
ORCID: 0000-0002-7218-3868

Yevhen O. Machynskyi
stezja.kiev.ua@gmail.com
ORCID: 0009-0000-6962-1866

Andrii S. Solomakha
a.solomakha@kpi.ua
ORCID: 0000-0002-1061-6277

Vladyslav I. Altyn
altyn.v.i.-tu51f@edu.kpi.ua
ORCID: 0009-0000-3211-3059

В. Ю. Щербина,
докт. техн. наук, професор

Є. О. Мачинський,
аспірант

А. С. Соломаха,
канд. техн. наук, доцент

В. І. Алтин,
аспірант

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ

Abstract. *Purpose*. The purpose of the paper is to find the velocity profile of the liquid at the interface with the cavity for the case of flow without and with evaporation, as well as to analytically analyze the effect of vapor extraction from the cavity on its geometric dimensions. *Methodology*. The work is based on an integrated approach that combines methods of hydrodynamics of multiphase media, boundary layer theory, and heat and mass transfer laws. Mathematical modelling of the velocity distribution in the diffusion boundary layer of the cavity is implemented using self-similar variables and the integral of probabilities. *Results*. A system of equations is proposed for finding the velocity profile at the interface with the cavity, taking into account the processes of vapor evaporation into the cavity. It is established that the high intensity of heat transfer in cavitation devices is due to the specifics of evaporation from the surface of the cavity, where, as a result of an increase in local flow velocities, the pressure decreases significantly below the pressure of the surrounding liquid. It is proven that this pressure drop activates a complex of additional effects that significantly increase the rate of vaporization. *Scientific novelty*. For the first time, the mutual influence of local hydrodynamic parameters of the cavitation flow and the kinetics of interphase heat and mass transfer at the interface of the media "liquid – vapor cavity" has been comprehensively taken into account. A refined mathematical description of the velocity distribution in the boundary layer has been obtained, taking into account intensive evaporation based on the integral error function, which allows predicting the dynamics of changes in the size of the cavity at different temperature regimes of the subcooled liquid. *Practical significance*. The results obtained are the basis for engineering calculations and future optimization of the design parameters of cavitation devices for water desalination and allow for a preliminary calculation of the process before experimental verification and implementation of a full-scale experiment.
Key words: cavitation; desalination; vapor cavity; liquid velocity.

Анотація. *Мета*. Знайти профіль швидкості рідини на межі з каверною для випадку течії без випаровування та з нею. Аналітично проаналізувати вплив відбору пари з каверни на її геометричні розміри. *Методика*. Робота базується на комплексному підході, що поєднує методи гідродинаміки багатофазних середовищ, теорію прикордонного шару та закони тепломасообміну. Математичне моделювання розподілу швидкостей у дифузійному прикордонному шарі каверни реалізовано із застосуванням автомодельних змінних та інтегралу ймовірностей (функції помилок). *Результати*. Запропоновано систему рівнянь для знаходження профілю швидкості на границі з каверною з урахуванням процесів випаровування пари в каверну. Встановлено, що висока інтенсивність теплообміну в кавітаційних апаратах зумовлена специфікою випаровування з поверхні каверни, де внаслідок зростання місцевих швидкостей течії тиск знижується значно нижче тиску навколишньої рідини. Доведено,

що цей перепад тиску активує комплекс додаткових ефектів, які суттєво підсилюють швидкість пароутворення. *Наукова новизна*. Вперше комплексно враховано взаємний вплив локальних гідродинамічних параметрів кавітаційної течії та кінетики міжфазного тепломасообміну на межі розділу середовищ «рідина – парова каверна». Отримано уточнений математичний опис розподілу швидкостей у прикордонному шарі з урахуванням інтенсивного випаровування на основі інтегральної функції помилок, що дозволяє прогнозувати динаміку зміни розмірів каверни при різних температурних режимах недогрітої рідини. *Практична значимість*. Отримані результати є основою для інженерного розрахунку та майбутньої оптимізації конструктивних параметрів кавітаційних апаратів для знесолення води та дозволяють здійснити попередній розрахунок процесу перед експериментальною перевіркою та здійсненням натурного експерименту.
Ключові слова: кавітація; знесолення; парова каверна; швидкість рідини.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

В останні роки нестача прісної води стає однією з головних глобальних проблем. Одним з основних шляхів розв'язання вказаної проблеми є опріснення морської води. На даний момент у світі існує три основні технології, які використовуються в промислових масштабах – зворотний осмос (RO), багатоступеневі установки миттєвого скипання (MSF) та багатоступенева дистиляція (MED). На долю цих трьох технологій припадає більше 90 % від всіх встановлених установок опріснення морської води [1]. Технології MSF та MED відносяться до термічних методів опріснення, які вимагають суттєвих затрат енергії: 12,7–15,0 кВт · год/м^3 для MSF та 5,–7,8 кВт · год/м^3 для MED [2,3]. Для RO споживання енергії знаходиться на значно нижчому рівні 2,5–4,0 кВт · год/м^3, що і зумовлює те, що в останні роки саме зворотній осмос використовують для нових опріснювальних станцій. Однак для технології зворотного осмосу потрібна ретельна попередня підготовка сирої води та існує необхідність в періодичній заміні мембран. Крім того, рівень вилучення води не перевищує 50 %, що не відповідає сучасним вимогам до сталого розвитку, оскільки в найближчі роки планується забороняти скидати солоний залишок (концентрат) після опріснювальних установок в навколишнє середовище [4]. Це вимагає розбудови технологій з нульовим скиданням рідини (Zero liquid discharge). В технологіях MSF та MED існує можливість до більшого вилучення, при доопрацювання останніх ступенів можлива навіть робота майже до сухого залишку, але високі затрати енергії сповільнюють застосування таких концентраторів. Все це спонукає до пошуку альтернативних способів отримання прісної води. Однією з можливих альтернативних технологій є використання технології на основі ефекту суперкавітації [5–7].

При опрісненні з використанням ефекту кавітації штучно створюється каверна, пара з якої відсмоктується та конденсується в окремо встановленому конденсаторі. Кавітаційний метод дистиляції можна віднести до термічного опріснення, оскільки по суті пара тут також утворюється в результаті фазового переходу. Але, на відміну від MSF та MED відсутня поверхня теплообміну, що суттєво інтенсифікує процес тепломасообміну на межі розділення пара-рідина, а також відсутня загроза утворення накипу. Експериментальні дані показують можливість роботи системи із споживанням енергії до 6 кВт · год/м^3 [2, 5, 7], що є конкурентним з основними великомасштабними промисловими технологіями опріснення, в тому числі з RO.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

В загальному випадку кавітація може створюватися нерухомим або обертовим об'єктом, який розміщено в потоці рідини. На даний момент відомо три конструкції кавітаційних пристроїв, призначених для опріснення.

Стаціонарний кавітатор виготовляють у вигляді конусного тіла, на яке з високою швидкістю набігає потік рідини. Пара забирається з каверни, що утворюється позаду конуса. В роботі [5] виконано чисельний аналіз такого випадку обтікання конуса за допомогою програмного забезпечення ANSYS FLUENT, що базується на методі скінченних об'ємів. Показано, що розмір каверни та опір збільшуються зі збільшенням кута конуса, що вказує на існування оптимального кута конусного кавітатора та швидкості набігання рідини. Основну увагу слід приділяти зменшенню гідравлічного опору, що вимагає проектування спеціальної обтічної форми для поперечного перерізу кавітатора. Наведені емпіричні формули для розрахунку розміру кавітаційної порожнини можуть в цьому допомогти. В роботі [8] описано гідродинамічний стенд для дослідження процесів кавітації за стаціонарним конусом. Отримані результати щодо поведінки та геометрії кавітаційної каверни від часу в залежності від швидкості рідини. Показано, що гідродинамічну кавітацію можна розглядати як явище, що має великий потенціал для використання при проектуванні ефективного опріснювального апарату. Наведено одну з можливих принципових схем такої установки. Автори припускають, що крім кавітаційного парогенератора, можна використовувати кавітацію, в тому числі для конденсації пари. На схемі представлено два контури: випарний та конденсаційний. Теплоту пароутворення, що відбирається в контурі випаровування, запропоновано повернути з контуру конденсації системою рекуперації.

Обертовий роторний кавітатор, що містить дві лопаті з клиноподібним поперечним перерізом та змінною товщиною задньої кромки досліджено аналітично в роботах [1, 9]. Кавітатор використовується для утворення суперкавітаційної каверни та виробництва пари, і тому його гідродинамічні характеристики мають велике значення для продуктивності опріснення. Експериментальна перевірка роботи кавітатора [3] показала принципову можливість реалізації процесу, проте утворена каверна не дозволяла реалізовувати ефективний процес опріснення. Тому в настпних роботах було аналітично досліджено роботу вплив форми лопаті та інших вхідних параметрів системи на продуктивність установки, а також визначено оптимальну форму лопатей [10, 11]. Вплив температури рідини на утворення каверни додатково досліджено в роботі [9].

В роботі [7] проведено тривимірне стаціонарне числове моделювання суперкавітуючих потоків у роторному суперкавітаційному випарнику за різних швидкостей обертання та тиску відбору, щоб дослідити вплив відбору пари на гідродинамічні характеристики та продуктивність опріснення. Визначено діапазони швидкості обертання та тиску відбору, придатні для роботи в режимі опріснення. Процес відбору пари впливає на форму каверни, однак має незначний вплив на морфологічні характеристики та характеристики опору за всіх швидкостей обертання. Відсмоктування пари сприяє генерації пари в каверні, водночас дещо зменшуючи середню об'ємну частку пари у потоці пари. Система має низьке енергоспоживання при роботі за низького тиску відсмоктування та швидкості обертання 3750 об/хв.

Тривимірні лопаті різних розмірів розроблені на основі емпіричних формул довжини каверні в наступній роботі [12]. Встановлено методи оцінки параметрів продуктивності опріснення для перевірки можливості використання результатів, отриманих за допомогою двовимірного числового моделювання, при проектуванні тривимірної форми лопаті. Тривимірне стаціонарне числове моделювання проводиться для суперкавітуючих потоків навколо обертового кавітатора з оптимізованою формою лопаті при різних швидкостях обертання. Експериментальні результати показали, що дві окремі каверни, що займають більшу частину простору між лопатями, утворювалися при швидкості обертання 5430 об/хв [13]. Форма лопаті з кутом 45º та швидкістю обертання 5000 об/хв визначена як оптимальна.

В експериментальній роботі [2] досліджено гідродинамічні характеристики обертальних кавітаторів з оптимізованою формою лопаті за різних швидкостей обертання, здійснено візуальне фотографування каверни на спеціально розробленому стенді. Особлива увага приділяється просторово-часовій еволюції каверни. Отримано емпіричну формулу для довжини порожнини, що враховує вплив обертання. Для підвищення продуктивності опріснення пропонується підвищувати температуру рідини. Це допомагає знизити швидкість обертання, за якої може бути досягнуто той самий розмір каверни, а також збільшується продуктивність відведення пари, оскільки зростає густина пари. Обидва ці фактори можуть зменшити споживання енергії установки.

Інші конструкції обертових кавітаторів для дистиляції розглянуті в роботах [14, 15, 16].

Проведений огляд підтверджує висновок, що на сьогоднішній день дистиляційні установки на принципі кавітації фактично перебувають на початковому етапі дослідження. Проведені експериментальні та аналітичні дослідження показали свою перспективність, проте всі описані пристрої перебувають на стадії лабораторного дослідження і поки що не створено жодної діючої повноцінної опріснювальної установки.

Це спонукає до проведення власних досліджень, які б на фундаментальному рівні дозволили описати процес утворення каверни з одночасним відбором пари з метою отримання прісної води. В даній роботі здійснюється аналітичний аналіз процесу обтікання

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Знайти профіль швидкості рідини на межі з каверною для випадку течії без випаровування та з нею. Аналітично проаналізувати вплив відбору пари з каверни на її геометричні розміри.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

Єдиною відомою роботою, в якій досліджується процес утворення каверни з точки зору роботи випарної установки, є робота [5]. Проте в розробленій аналітичній моделі відсутнє врахування процесу випаровування через міжфазну поверхню.

Задача пошуку профілю швидкостей всередині прикордонного шару на міжфазному кордоні каверни вирішувалася як спільне рішення для рідкої та парової компоненти.

За умови малої відносної зміни швидкості біля межі каверни та значної абсолютної її величини диференціальні рівняння задачі набувають вигляду:

$$\frac{\partial v_{xi}}{\partial x} = \frac{v_i}{v_{\infty i}} \frac{\partial^2 v_{xi}}{\partial y^2}; \quad (i = 1,2). \tag{1}$$

Граничні умови для каверни вибиралися з урахуванням прилипання на кромці кавітатора та умов сполучення на міжфазному кордоні пара-рідина:

$$x = 0; \quad y = 0 \quad v_{x1} = 0;$$

$$x > 0; \quad y = 0; \quad v_{x1} = v_{x2}; \quad \mu_1 \frac{\partial v_{x1}}{\partial y} = \mu_2 \frac{\partial v_{x2}}{\partial y}; \tag{2}$$

$$y \to \infty; \quad v_{x1} = v_{1\infty}; \quad y \to -\infty; \quad v_{x2} = v_{2\infty};$$

$x > 0$; $y = 0$; $p_1 = p_2$ (для поперечної компоненти швидкості).

Розв'язання задачі (1)–(2) було виконано у змінних

$$\eta = \frac{y}{v4\frac{v_i}{v_\infty}x},$$

де $v_{i\infty}$ – швидкість на зовнішньому кордоні прикордонного шару.

Для профілю швидкості рідини на межі каверни отримано вираз:

$$v_{1x} = v_{1\infty}\left[\frac{k(1-n)}{k-n}\frac{\sqrt{\pi}}{2}erf(\eta) + \frac{n(k-1)}{k-n}\right], \qquad (3)$$

де $k = \frac{\rho_2}{\rho_1}\frac{v_2^{1/2}}{v_1^{1/2}}\frac{v_{2\infty}^{3/2}}{v_{1\infty}^{1/2}}$, $n = \frac{v_{2\infty}}{v_{1\infty}}$.

Для обчислення (n) необхідно було знати $v_{2\infty}$, яке визначалося за ступенем захоплення пари рідкою фазою, що дорівнює ступеню ковзання пари (S_r)

$$h = \frac{1}{1+S_r}.$$

При розрахунку S_r використовувалися емпіричні залежності, вибрані за величиною критерію Галілея:

$$Ga = \frac{gD_o^3}{v_1^2}.$$

У процесі визначення профілю швидкості при обтіканні елемента кавітації важливе значення має розрахунок середньої товщини прикордонного шару на межі каверни (δ_n). Цей параметр знаходимо за точкою перегину профілю швидкості v_{1x} (див. рисунок 1)

$$\frac{1}{Nu} = 2\int_0^{\delta_n}\frac{\left(\int_0^{\delta_n} v_{1x}ydy\right)^2}{\left(1+\frac{\lambda_T}{\lambda}\right)y}dy.$$

У цьому дослідженні з визначенням профілю швидкості на межі каверни вирішувалося завдання визначення температурного поля при теплопередачі на межі каверни без урахування випаровування.

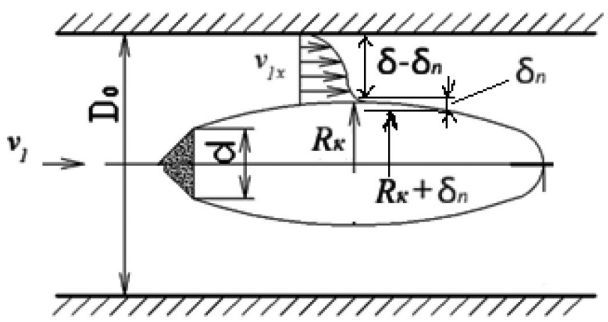


Рис. 1. До визначення гідродинамічного профілю каверни

Локальний тепловий потік в цьому випадку має вигляд

$$q = \left(\frac{\lambda}{R}\frac{\partial T_1}{\partial \varepsilon}\right)_{\varepsilon=h}.$$

Математична модель температурного поля при теплопередачі біля межі каверни з урахуванням випаровування формулюється як

$$\rho_i\left(v_{ix}^*\frac{\partial v_{ix}^*}{\partial x} - v_{ix}^*\frac{\partial v_{ix}^*}{\partial r}\right) = -\frac{\partial P_i}{\partial x} + \frac{1}{R^*-r}\frac{\partial}{\partial r}\left[\left(R^*-r\right)\tau_i\right] +$$
$$+\left[(2-i)\rho_1 - (-1)^{i-1}\rho_2\right]g - \frac{\partial}{\partial r}\left[\left(R^*-r\right)v_{ir}^*\right] +$$
$$+\frac{\partial}{\partial x}\left[\left(R^*-r\right)v_{ix}^*\right] = 0,$$

де $i = 1$ – рідина;

$i = 2$ – пара;

r – відраховується від стінки до межі каверни.

Граничні умови:

при $r = 0;\ v_{ix}^* = v_{ir}^* = 0;\ \tau_1 = \tau_{c\bar{u}}$;

при $r = \delta^*;\ v_{1r\delta}^* = \frac{q}{\lambda\rho_1}$; де $\rho_1 V_{1r\delta}^* = \rho_2 V_{2r\delta}^*;\ v_{ix}^* = v_{x\delta}^*;$

$\tau_1 = \tau_{i\delta}$.

Початкові умови при $x = 0,\ \overline{v}_i^* = \overline{v}_{iA}^*;\ \delta^* = \delta_n^*$.

ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Процес випаровування в кавітаційних апаратах базується на створенні розвиненої течії при обтіканні кавітатора недогрітою рідиною з наступним відбором пари з утвореної каверни. Висока інтенсивність теплообміну в таких системах зумовлена специфікою випаровування з поверхні каверни, де внаслідок гідродинамічних факторів (зростання місцевих швидкостей) тиск є істотно нижчим, ніж у навколишній рідині. Цей перепад тиску активує додаткові ефекти, які інтенсифікують пароутворення, а подальше підвищення температури збільшує тиск насичення водяної пари, через що тепломасообмінні процеси починають суттєво впливати на підсумкові розміри самої каверни.

В той же час аналітично врахувати, як відбір пари з каверни буде впливати на її форму та поведінку прикордонного шару, практично нереально. Для цього потрібно провести окремі експериментальні дослідження.

ВИСНОВКИ

Рішення наведених вище математичних рівнянь дозволяє визначити фактори, що інтенсифікують теплопередачу на межі каверни. В той же час існують ряд додаткових моментів, які вимагають експериментального дослідження і які можливо буде врахувати лише після натурного випробування. А саме,

нестаціонарність вздовж межі каверни зі зворотними гідродинамічними та тепловими потоками; Стефанів потік; хвилеутворення до поверхні каверни та пульсації її об'єму; активація середовища за рахунок утворення вільних радикалів при колапсуванні кавітаційних бульбашок в хвостовій частині каверни; ефект випрямленої дифузії до теплопередачі; збільшення діючої різниці температур за рахунок паровідбору.

Як вказані фактори будуть впливати на поведінку каверни буде розглянуто в наступних публікаціях, в яких планується представити результати експериментальної перевірки на спеціально спроектованому стенді наведених рівнянь.

REFERENCES

[1] D. S. Likhachev, F. C. Li, (2013). Large-scale water desalination methods: a review and new perspectives, Desalination Water Treatment, 51, 2836–2849. https://doi.org/10.1080/19443994.2012.750792

[2] Zhi-Ying Zheng, Lu Wang, Tong-Zhou Wei, Wei-Hua Cai, Hui Li, Li-Ming Yao, Feng-Chen Li. Experimental investigation of temperature effect on hydrodynamic characteristics of natural cavitation in rotational supercavitating evaporator for desalination Renewable (2021), Energy, 174, 278–292. https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.04.038

[3] Likhachev D. S., Li F. C., Kulagin V. A. (2014). Experimental study of thermohydrodynamic characteristics of a rotational supercavitation evaporator for desalination. J. Scince China Technological Sciences. Vol. 57, № 11, 2115–2130. https://doi.org/10.1007/s11431-014-5631-0

[4] A. P. de Nicolás, A. Molina-García, F. Vera-García (2023). Performance evaluation and feasibility study of a cooling tower model for zero liquid discharge-desalination processes. Energy Conversion and Management, 297, 117673. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117673

[5] Zheng Z. Y., Li F.C., Li Q. (2015). Numerical study on the characteristics of natural supercavitation by planar symmetric wedge-shaped cavitators for rotational supercavitating evaporator. J. Scince China Technological Sciences. 58(6), 1072–1083. https://doi.org/10.1007/s11431-015-5827-y

[6] Z. Y. Zheng et al. (2020). Numerical study on morphological characteristics of rotational natural supercavitation by rotational supercavitating evaporator with optimized blade shape, J. Hydrodyn, 32, 468–485. https://doi.org/10.1007/s42241-019-0007-3

[7] Z. Y. Zheng et al. (2019). Numerical study on the effect of steam extraction on hydrodynamic characteristics of rotational supercavitating evaporator for desalination, Desalination, 455, 1–18. https://doi.org/10.1016/j.desal.2018.12.012

[8] A Yu Radzyuk et al. (2019). The determination of the dependence of the cavern length on the flow velocity on an experimental hydrodynamic workbench, J. Phys.: Conf. Ser. 1399, 022050. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1399/2/022050

[9] Z Y Zheng et al. (2015). Numerical simulation of the temperature effects on the performance of rotational supercavitating evaporator. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng., 72, 062054. https://doi.org/10.1088/1757-899X/72/6/062054

[10] Z Y Zheng et al. (2016). Numerical study on the performance of rotational supercavitating evaporator with optimized blade shape. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng., 129, 012014. https://doi.org/10.1088/1757-899X/129/1/012014

[11] Q Li et al. (2016). Numerical study on thermodynamic characteristics of rotational supercavitating evaporator. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 129, 012044. https://doi.org/10.1088/1757-899X/129/1/012044

[12] Zhi-Ying Zheng et al. (2020). Numerical study on morphological characteristics of rotational natural supercavitation by rotational supercavitating evaporator with optimized blade shape. Journal of Hydrodynamics, Volume 32, 468–485. https://doi.org/10.1007/s42241-019-0007-3

[13] Zhi-Ying Zheng et al. (2020). Spatiotemporal Evolution of Rotational Natural Cavitation in Rotational Supercavitating Evaporator for Desalination. Journal of Fluids Engineering, Vol. 142(5), 051205, Paper No: FE-19-1426. https://doi.org/10.1115/1.4045612

[14] L.A.Crum et al. (2013). A method for desalination and water remediation by hydrodynamic cavitation. Proc. Mtgs. Acoust, 19, 075028. https://doi.org/10.1121/1.4800921

[15] Li, W. et al (2023). Study on Cavitation of Port Plate of Seawater Desalination Pump with Energy Recovery Function. Processes, 11(3), 743. https://doi.org/10.3390/pr11030743

[16] Licheng Xue et al. (2025). Effect of structural parameters on cavitation performance of a novel counter-rotating hydrodynamic cavitation reactor for seawater pre-treatment, Desalination, Volume 610, 118927. https://doi.org/10.1016/j.desal.2025.118927

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

[1] D. S. Likhachev, F. C. Li, (2013). Large-scale water desalination methods: a review and new perspectives, Desalination Water Treatment, 51, 2836–2849. https://doi.org/10.1080/19443994.2012.750792

[2] Zhi-Ying Zheng, Lu Wang, Tong-Zhou Wei, Wei-Hua Cai, Hui Li, Li-Ming Yao, Feng-Chen Li. Experimental investigation of temperature effect on hydrodynamic characteristics of natural cavitation in rotational supercavitating evaporator for desalination Renewable (2021), Energy, 174, 278–292. https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.04.038

[3] Likhachev D. S., Li F. C., Kulagin V. A. (2014). Experimental study of thermohydrodynamic characteristics of a rotational supercavitation evaporator for desalination. J. Scince China Technological Sciences. Vol. 57, № 11, 2115–2130. https://doi.org/10.1007/s11431-014-5631-0

[4] A. P. de Nicolás, A. Molina-García, F. Vera-García (2023). Performance evaluation and feasibility study of a cooling tower model for zero liquid discharge-desalination processes. Energy Conversion and Management, 297, 117673. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117673

[5] Zheng Z. Y., Li F.C., Li Q. (2015). Numerical study on the characteristics of natural supercavitation by planar symmetric wedge-shaped cavitators for rotational supercavitating evaporator. J. Scince China Technological Sciences. 58(6), 1072–1083. https://doi.org/10.1007/s11431-015-5827-y

[6] Z. Y. Zheng et al. (2020). Numerical study on morphological characteristics of rotational natural supercavitation by rotational supercavitating evaporator with optimized blade shape, J. Hydrodyn, 32, 468–485. https://doi.org/10.1007/s42241-019-0007-3

[7] Z. Y. Zheng et al. (2019). Numerical study on the effect of steam extraction on hydrodynamic characteristics of rotational supercavitating evaporator for desalination, Desalination, 455, 1–18. https://doi.org/10.1016/j.desal.2018.12.012

[8] A Yu Radzyuk et al. (2019). The determination of the dependence of the cavern length on the flow velocity on an experimental hydrodynamic workbench, J. Phys.: Conf. Ser. 1399, 022050. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1399/2/022050

[9] Z Y Zheng et al. (2015). Numerical simulation of the temperature effects on the performance of rotational supercavitating evaporator. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng., 72, 062054. https://doi.org/10.1088/1757-899X/72/6/062054

[10] Z Y Zheng et al. (2016). Numerical study on the performance of rotational supercavitating evaporator with optimized blade shape. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng., 129, 012014. https://doi.org/10.1088/1757-899X/129/1/012014

[11] Q Li et al. (2016). Numerical study on thermodynamic characteristics of rotational supercavitating evaporator. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 129, 012044. https://doi.org/10.1088/1757-899X/129/1/012044

[12] Zhi-Ying Zheng et al. (2020). Numerical study on morphological characteristics of rotational natural supercavitation by rotational supercavitating evaporator with optimized blade shape. Journal of Hydrodynamics, Volume 32, 468–485. https://doi.org/10.1007/s42241-019-0007-3

[13] Zhi-Ying Zheng et al. (2020). Spatiotemporal Evolution of Rotational Natural Cavitation in Rotational Supercavitating Evaporator for Desalination. Journal of Fluids Engineering, Vol. 142(5), 051205, Paper No: FE-19-1426. https://doi.org/10.1115/1.4045612

[14] L.A.Crum et al. (2013). A method for desalination and water remediation by hydrodynamic cavitation. Proc. Mtgs. Acoust, 19, 075028. https://doi.org/10.1121/1.4800921

[15] Li, W. et al (2023). Study on Cavitation of Port Plate of Seawater Desalination Pump with Energy Recovery Function. Processes, 11(3), 743. https://doi.org/10.3390/pr11030743

[16] Licheng Xue et al. (2025). Effect of structural parameters on cavitation performance of a novel counter-rotating hydrodynamic cavitation reactor for seawater pre-treatment, Desalination, Volume 610, 118927. https://doi.org/10.1016/j.desal.2025.118927

© Щербина В. Ю., Мачинський Є. О., Соломаха А. С., Алтин В. І.
Дата першого надходження статті до видання: 30.07.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 21.08.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 02.11.2026



Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)