

ДУШЕНКО ОЛЕКСАНДР

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0009-0000-3588-6874>

e-mail: dushenko@teplovik.org

ТКАЧУК ВІТАЛІЙ

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0003-0640-2740>

e-mail: tkachuk.v.p@gmail.com

МАРЧЕНКО МАКСИМ

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-8645-3013>

e-mail: max@solidworks.net.ua

ДОСЛІДЖЕННЯ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ КАВІТАЦІЙНИХ НАСАДКІВ ТА РЕЖИМІВ РОБОТИ ОБЛАДНАННЯ ВОДОПІДГОТОВКИ ДЛЯ ТЕПЛОМЕРЕЖ У SOLIDWORKS І ПРАКТИЧНЕ ВИКОРИСТАННЯ

За останній час зі збільшенням числа досліджень по кавітаційному впливу на рідинні середовища було показано, що кавітаційні струмені можуть бути практично застосовні у багатьох корисних технологіях. Крім уже широко використовуваного явища прискорення хімічних реакцій при приготуванні емульсій і суспензій, зміні властивостей та складу води з'являються нові сучасні технічні рішення використання кавітації. У роботі наведено можливості програмного продукту *SOLIDWORKS Flow Simulation*, для вирішення науково-технічної задачі визначення кавітаційних характеристик досліджуваних насадків. Проведено дослідження конструктивних параметрів кавітаційних насадків у *SOLIDWORKS Flow Simulation* на характеристики потоку згідно числа кавітації та проаналізовано максимальну здатність перемішування потоку рідини для створення інтенсивних умов проведення окислювальних та водневих реакцій у реальних режимах роботи обладнання та отримано практичне підтвердження працездатності запропонованих рішень. З отриманих результатів моделювання течії рідини крізь насадку встановлено, що найбільший кавітаційний вплив здійснюється згідно числа кавітації при вхідному тиску 0,12 МПа. Найкращий ефект перемішування рідини на виході з насадки отримано у насадку ступеневому на вході та виході. З точки зору технології виготовлення більш технологічним за виготовленням є насадок ступеневий на вході та виході, який було застосовано в експериментальному обладнанні. Виготовлено експериментальне обладнання з можливістю застосування індивідуально окремих блоків, а саме гідростатичного кавітатора, блока омагнічування, вібраційного кавітатора та застосування їх в комплексі. Практичне застосування впливу на склад водопровідної води оцінювалося зміною показників: рН, загальної мінералізації (показник – TDS), окислювального відновлювального потенціалу (ORP) та аналізом осаду який утворюється за часом після відстоювання (три доби). Проведені дослідження дають можливість проектування обладнання для водопідготовки для тепломереж згідно необхідної продуктивності реальних потреб.

Ключові слова: кавітація, обладнання, насадки, комп'ютерне моделювання, властивості води.

DUSHENKO OLEKSANDR, TKACHUK VITALIY, MARCHENKO MAKSYM

Khmelnitskyi National University

RESEARCH OF DESIGN PARAMETERS OF CAVITATION NOZZLES AND OPERATING MODES OF WATER PREPARATION EQUIPMENT FOR HEATING NETWORKS IN SOLIDWORKS AND PRACTICAL USE

Recently, with the increase in the number of studies on the cavitation effect on liquid media, it has been shown that cavitation jets can be practically applicable in many useful technologies. In addition to the already widely used phenomenon of acceleration of chemical reactions in the preparation of emulsions and suspensions, changing the properties and composition of water, new modern technical solutions for the use of cavitation appear. The paper considers the issue of engineering analysis of technical systems by means of computer modeling, in particular, the study of the design parameters of cavitation nozzles using the *SOLIDWORKS Flow Simulation* engineering analysis system, which allows conducting numerical experiments to determine their characteristics, namely, to determine the cavitation effect on changing the properties and composition of water. The paper presents the capabilities of the *SOLIDWORKS Flow Simulation* software product to solve the scientific and technical problem of determining the cavitation characteristics of the nozzles under study. The design parameters of cavitation nozzles were studied in *SOLIDWORKS Flow Simulation* for flow characteristics according to the cavitation number and the maximum mixing capacity of the liquid flow was analyzed to create intensive conditions for oxidative and hydrogen reactions in real operating modes of water treatment equipment for heating networks and practical confirmation of the operability of the proposed solutions was obtained. From the obtained results of modeling the liquid flow through the nozzles, it was established that the greatest cavitation effect is exerted according to the cavitation number at an inlet pressure of 0.12 MPa. The best effect of liquid mixing at the outlet of the nozzle was obtained in the stepped nozzle at the inlet and outlet. From the point of view of manufacturing technology, the stepped nozzle at the inlet and outlet, which was used in the experimental equipment, is more technologically advanced in terms of manufacturing. Experimental equipment was manufactured with the possibility of using individual blocks, namely a hydrostatic cavitator, a magnetization block, a vibration cavitator and their use in a complex. The practical application of the impact on the composition of tap water was evaluated by changing the indicators: pH, total mineralization (indicator - TDS), oxidation-reduction potential (ORP) and analysis of the sediment that forms over time after settling (three days). The conducted studies make it possible to design equipment for water treatment for heating networks according to the required productivity of real needs.

Keywords: cavitation, equipment, nozzles, computer modeling, water properties.

Стаття надійшла до редакції / Received 13.10.2025

Прийнята до друку / Accepted 15.11.2025

Вступ

Термін служби котельних установок значною мірою залежить від фізико-хімічних властивостей води. Низька якість води призводить до зниження тепловіддачі, засмічення обладнання, скорочення терміну служби, зниження рентабельності та завантаження, а також збільшення часу простою. Вода з високим вмістом розчинених забруднень, тобто солей жорсткості, таких як солі кальцію і магнію, є найбільш небезпечною для котельного обладнання. При виборі ефективного обладнання для підготовки води для котелень мають бути врахованими його універсальність, продуктивність, енергоефективність, зручність і безпечність обслуговування, а також можливість одержання її із заданими характеристиками.

Високоєфективними і продуктивними пристроями з низькими питомими енерговитратами для обробки рідких водних систем показали себе кавітаційні апарати різних конструкцій [1]. Проточні гідродинамічні кавітаційні апарати статичного типу представляють собою надійне високоєфективне обладнання для розчинення, змішування, диспергування, емульгування гомогенізації в дисперсних системах типу «рідина-рідина» або «рідина-тверда речовина». Відмінною ознакою цих апаратів є просторово-часова локалізація енергії, що дає можливість при порівняно низькому рівні енергії створювати направлені імпульси великої потужності. Використання гідродинамічної кавітації в обладнанні цього типу дозволяє інтенсифікувати і прискорювати технологічні процеси в рідких середовищах, при цьому значно зменшуючи витрати енергії. Ефективність кавітаційних апаратів пов'язана з виникненням супутніх до явища кавітації ефектів, таких як ударні мікрохвилі, вібротурбулізація, дифузія і теплообмін, які виникають при утворенні, зростанні і колапсі бульбашок. В результаті, створюються умови для ефективного проходження гідромеханічних, фізичних і хімічних процесів на мікро- і нанорівнях [1-3].

За класифікацією, запропонованою Блейком механізм виникнення кавітації трактується або як інерційний розвиток бульбашок (парова кавітація), або як дифузія розчиненого газу в ядро кавітації (газова кавітація) з рідини, що тече або з тріщин, що знаходяться на поверхні тіла (гіпотеза Корнфельда-Суворова) [4, 5]. Місце порушення спільності рідини прийнято зв'язувати з наявністю в рідині так званих кавітаційних захворювань – яких-небудь неоднорідностей в рідині. Такими неоднорідностями можуть бути, як тверді включення, так і гази, що знаходяться в рідині.

Один із способів підвищення ефективності процесів, пов'язаних з кавітаційними течіями, є розробка та розвиток експериментальної техніки проведення модельних і природних досліджень з урахуванням масштабного ефекту. Досвід створення цієї техніки залежить від завдань, що стоять перед дослідниками, він завжди унікальний і повинен бути відтворений і використаний.

Аналіз літературних джерел

За останній час зі збільшенням числа досліджень по кавітаційному впливу на рідинні середовища було показано, що кавітаційні струмені можуть бути практично застосовні у багатьох корисних технологіях. Крім уже широко використовуваного явища прискорення хімічних реакцій при приготуванні емульсій і суспензій, зміні властивостей та складу води з'являються нові сучасні технічні рішення використання кавітації [6 – 32].

Серед них широко досліджено експериментально і теоретично [33, 34], в тому числі і з використанням програмних пакетів моделювання гідродинамічних процесів [35– 39], виникнення умов та різних по конструкції технічних засобів утворення кавітаційних процесів у різних технологіях.

В звичайних умовах для рідин з джерел або водопроводу при кавітаційному впливі не спостерігається виникнення чистих газових або парових бульбашок і бульбашки, як правило, заповнені парогазовою сумішшю. Відомо, що у рідині може знаходитися до 10% розчиненого повітря та різних газів [5].

Росту парогазової бульбашки протидіє приєднана маса рідини, статичний тиск і тиск від сили поверхневого натягу. Зростання або витіснення кавітаційної бульбашки відбувається при переважній кількості тих або інших ефектів. Нелінійність фазового балансу призводить до того, що середня температура бульбашки знижується по відношенню до температури рідини навколишнього середовища, а це викликає потік тепла з рідини в бульбашки, випарювання рідини і зростання розмірів бульбашки в середньому за період.

У припущенні, що парогазова суміш в реальній кавітаційній бульбашці при адіабатичному стисканні веде себе як ідеальний газ, тиск у бульбашці в момент сплескування визначається параметром газотримання α .

Розрізняють дві стадії кавітації: початкову та розвинену. Існують різні форми початкової стадії кавітації при натіканні потоку на сферичне тіло (рис. 1). Якщо рідина знаходиться під тиском, рівним тиску її насичених парів, то може виникнути парова кавітація. Через поверхню бульбашки завжди проходить дифузія газу – виникає газова кавітація. Практично завжди спостерігається парогазова кавітація.

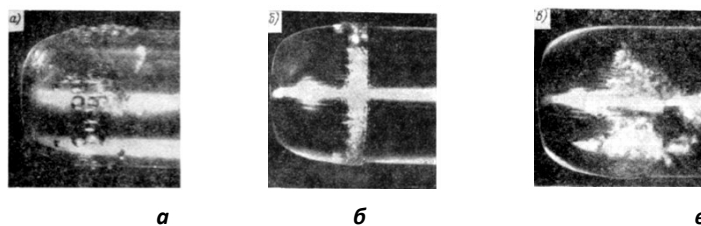


Рис. 1. Різні форми початкової стадії кавітації: а – бульбашкова; б – плівкова у вигляді паса; в – у вигляді плям

Модель фізико-хімічних процесів, що проходять в кавітаційній бульбашці і притягує до нього обсяг рідини, представлена в наступному вигляді [5]. У кавітаційну бульбашку можуть проникнути пари води, розчинені гази, а також речовини з високою пружністю пара та не можуть проникнути іони або молекули нелетучих розчинених речовин. Енергії, що виділяється в процесі скупчення бульбашки, достатньо для збудження, іонізації та дисоціації молекул води, газу та речовин з високою пружністю пари всередині кавітаційної порожнини. На цій стадії будь-який із присутніх газів є активним компонентом, що бере участь у передачі енергії збудження, перезарядці та інших процесах. Дія звукового поля на речовину, що проникає в бульбашку, є безпосередньою, прямою, через дію активних газів O_2 , H_2 і N_2 в кавітаційній бульбашці подвійне:

по-перше, O_2 і H_2 беруть участь в реакції трансформації радикалів:

$H^\circ + O_2 \rightarrow HO^\circ_2$, $OH^\circ + H_2 \rightarrow H^\circ + H_2O$, а N_2 – в газових звукохімічних реакціях, кінцевим результатом яких є фіксація азоту: $N_2 + O_2 \rightarrow NO_2$, $N_2 + H_2 \rightarrow NH_3$;

по-друге, хімічно активні гази, що проникають у кавітаційну бульбашку, беруть участь, так само як і благородні гази, в передачі енергії електронного збудження молекулам води, а також в процесі перезарядки. Символом))) позначено хімічну дію звука.

При сплескуванні кавітаційної бульбашки в розчин переходять радикали H° , OH° , іони та електрони малої енергії, що утворилися в газовій фазі при розщепленні молекул H_2O і речовини з високою пружністю пара, продукти їх взаємодії і часткових рекомбінацій, а також метастабільні збуджені молекули H_2O . Сумарну схему кавітаційного розщеплення молекули води представлено в наступному вигляді:



Виникаючі в системі активні частинки після переходу в розчин сольватуються і реагують з розчиненими речовинами. На цій стадії, коли здійснюються акустичні коливання, на хід процесу можуть надавати вплив практично тільки хімічно активні гази – O_2 і H_2 . В кінцевому рахунку, вплив кавітації на водні розчини зводиться до єдиного процесу – розщепленню молекул води в кавітаційних бульбашках. Незалежно від природи розчинених речовин, звук діє на одну речовину – на воду, що призводить до зміни її фізико-хімічних властивостей: збільшення рН, електропровідності води, збільшення кількості вільних іонів і активних радикалів, структуризації та активації молекул.

Питаннями виділення газу з рідкої фази займалися дослідники [5]. Відомо, що в технічних рідинах є розчинене повітря чи газ. Кількість розчинених газів у рідині підкоряється закону Генрі-Дальтона.

$$V_g = \lambda V_p \frac{P_2}{P_1}, \quad (2)$$

де V_g і V_p – об'єм розчиненого газу й об'єм рідини;

P_1 і P_2 – початковий і кінцевий тиски, під яким знаходиться рідина; λ – коефіцієнт розчинності газу в рідині.

Значення коефіцієнта λ для різних газів у рідинах коливається в широких межах від 2 до 11.

Розчинені гази будуть виділятися з рідини при зниженні тиску за умови:

$$\frac{P_g}{P_a} \leq \frac{\lambda_1}{\lambda(P_a, T)}, \quad (3)$$

де P_a – атмосферний тиск;

T – температура; $\lambda = \frac{V_g}{V_p}$.

Зародкові пухирці при падінні тиску перетерплюють стійкі зміни розмірів: спочатку хибна, потім газова кавітація. При хибній кавітації газові пухирці великих розмірів можуть значно збільшуватися, навіть при тисках, що перевищують тиск насичених парів P_n . Хибна кавітація не викликає кавітаційної ерозії.

Відповідно тиски, при яких виникають газова й парова кавітація визначаються за залежностями:

$$P_{кав.г} = P_n + P_g - \frac{2\sigma}{R_0} \sqrt{\frac{P_g}{P_0 - P_n + 2\sigma/R_0}};$$

$$P_{кав.п} = P_n - \frac{2}{3\sqrt{3}} \sqrt{\frac{2\sigma/R_0}{P_0 - P_n + 2\sigma/R_0}}, \quad (4)$$

де $P_{кав.г}$, $P_{кав.п}$ – тиск газової й парової кавітації відповідно;

P_n – тиск насичених парів;

P_g – тиск газу, що насичує рідину;

σ – коефіцієнт поверхневого натягу;

R_0 – вихідний радіус пухирця;

P_0 – вихідний зовнішній тиск.

Ці вирази показують, що тиск парової кавітації $P_{кав.п}$ завжди нижче тиску насиченого пару рідини, у той час як тиск газової кавітації $P_{кав.г}$ перевищує P_n тим у більшому ступені, чим вище тиск газу, що насичує рідину, P_g і більші розміри зародкових пухирців.

З аналізу джерел встановлено значний вплив кавітаційних процесів на водне середовище [3-5, 40-41].

Проаналізувавши переваги та недоліки різних кавітаційних пристроїв, запропоновано провести ряд досліджень по моделюванню явища кавітації у насадках різної конструкції та визначити характер зміни складу і властивостей води, застосовуючи гідрокавітаційний режим у проточному кавітаторі та з додатковим впливом магнітного поля з градієнтом напруженості вздовж потоку рідини та з додатковим впливом на середовище вібраційного кавітатора.

Об'єкт та методи дослідження

Для проведення визначення величини кавітаційного впливу різних по конструкції насадків на зміну властивостей та складу води для дослідження було використано програмний продукт SOLIDWORKS Flow Simulation.

SOLIDWORKS Flow Simulation – це програмне забезпечення на базі SOLIDWORKS для розрахунку потоків рідини всередині і поза моделями SOLIDWORKS.

За допомогою Flow Simulation можна вивчати широкий спектр явищ потоку рідини і теплопередачі, які включають наступне:

- зовнішні та внутрішні потоки рідини;
- стаціонарні та залежні від часу потоки рідини;
- течії нестисливої рідини;
- дозвукові, транзвукові та надзвукові течії газу;
- течії рідини з примежовими шарами, включаючи ефекти шорсткості стінок;
- ламінарні та турбулентні потоки рідини;
- багатовидові рідини та багатокомпонентні тверді тіла;
- течії рідини в моделях з рухомими/обертливими поверхнями та/або деталями;
- кавітація в потоках нестисливої рідини.

Flow Simulation базується на розв'язанні рівняння Нав'є-Стокса, які є формулюваннями законів збереження маси, імпульсу та енергії для потоків рідини. Рівняння доповнюються рівняннями стану рідини, що визначають природу рідини, та емпіричними залежностями густини, в'язкості та теплопровідності рідини від температури. Не пружні не ньютонівські рідини розглядаються введенням залежності їхньої динамічної в'язкості від швидкості зсуву потоку і температури, а стисливі рідини - введенням залежності їхньої густини від тиску. Конкретна задача остаточно задається визначенням її геометрії, граничних і початкових умов.

Більшість потоків рідини, що зустрічаються в інженерній практиці, є турбулентними, тому Flow Simulation в основному був розроблений для моделювання та вивчення турбулентних потоків. Для прогнозування турбулентних потоків використовуються усереднені за Фавром рівняння Нав'є-Стокса, в яких розглядаються усереднені за часом ефекти впливу турбулентності потоку на параметри потоку, тоді як інші, тобто великомасштабні, залежні від часу явища враховуються безпосередньо. Завдяки цій процедурі в рівняннях з'являються додаткові члени, відомі як напруження Рейнольдса, для яких необхідно додаткову інформацію. Щоб закрити цю систему рівнянь, Flow Simulation використовує рівняння переносу для турбулентної кінетичної енергії та швидкості її розсіювання, так звану k-ε модель.

Flow Simulation використовує одну систему рівнянь для опису як ламінарних, так і турбулентних потоків. Більше того, можливий перехід від ламінарного до турбулентного стану та/або навпаки.

Закони збереження маси, кутового моменту та енергії в локальній декартовій системі координат (наприклад, системі координат, що обертається) можна записати у формі збереження наступним чином:

$$\begin{aligned} \frac{dp}{dt} + \frac{d}{dx_i}(\rho u_i) &= S_M^p, \\ \frac{d\rho u_i}{dt} + \frac{d}{dx_j}(\rho u_i u_j) + \frac{dp}{dx_i} &= \frac{d}{dx_i}(\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + S_i + S_{ji}^p, \quad i = 1, 2, 3; \quad j = 1, 2, 3, \\ \frac{d\rho H}{dt} + \frac{d\rho u_i H}{dx_i} &= \frac{d}{dx_i}[u_j(\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + \frac{dp}{dt} + S_i u_i + S_H^p + Q_H], \\ H &= h(P, T, y) + \frac{u^2}{2} + k, \end{aligned} \quad (5)$$

де u – швидкість рідини,

ρ – густина рідини,

S_i – розподілена за масою зовнішня сила на одиницю маси, зумовлена опором пористого середовища, силою тяжіння та відцентровою силою.

H – повна ентальпія в локальній системі відліку,

$h(P, T, y)$ – теплова ентальпія при заданому тиску (P), температурі (T) та складі суміші компонентів,

k – кінетична енергія турбулентності,

Q_H – джерело або поглинач тепла в одиниці об'єму,

τ_{ij} – тензор в'язких напружень зсуву,

q_i – дифузійний тепловий потік.

Дослідження кавітаційних моделей проводиться за наступними припущеннями. Вважається, що рідина є однорідною газорідинною сумішшю, в якій газова фаза складається з пари та неконденсованого (розчиненого) газу. Масова частка пари визначається за термодинамічними умовами локальної рівноваги. Масова частка розчиненого газу є константою, яка може бути змінена користувачем.

Швидкості і температури газоподібної (включаючи пару і газ, що не конденсується) і рідкої фаз вважаються однаковими.

У кавітаційних моделях зроблено наступні припущення та обмеження:

- у рівноважній кавітаційній моделі кавітація наразі доступна лише для попередньо визначеної води (при визначенні рідин проекту слід вибрати воду зі списку Попередньо визначених рідин).
- кавітаційний процес вважається рівноважним.

- суміш вважається однорідною двофазною рідиною, швидкості і температури газоподібної (включаючи пару і газ, що не конденсується) і рідкої фаз вважаються однаковими.
- модель не описує детальної структури кавітаційної області, тобто параметрів окремих бульбашок пари та міграції бульбашок.
- температура і тиск в області фазового переходу мають бути в таких межах: $280.15 \text{ K} < T < 583.15 \text{ K}$, $10^3 \text{ Pa} < P < 10^7 \text{ Pa}$.
- об'ємна частка пари обмежена 0,95. Параметри потоку при початкових і граничних умовах повинні задовольняти цій вимозі.
- опція Кавітація не застосовується, якщо ви розраховуєте потік рідини в моделі без отворів для потоку (вхідного і вихідного).
- область рідини, в якій відбувається кавітація, повинна бути розділена дрібною розрахунковою сіткою.
- якщо розрахунок завершився або був зупинений, а опція Кавітація була увімкнена або вимкнена, розрахунок не може бути відновлений або продовжений і повинен бути перезапущений з самого початку.

Густина газорідинної суміші розраховується як:

$$\rho = \frac{1}{v}, v = y_g \frac{R_{y_{\text{г}} T}}{P \mu_g} + (1 - y_g - y_v) v_i(T, P) + y_v \frac{R_{y_{\text{в}} T z_v(T, P)}}{P \mu_v}, \quad (6)$$

де v – питомий об'єм газорідинної суміші,

v_i – питомий об'єм рідини,

$z_v(T, P)$ – коефіцієнт стисливості пари,

$R_{y_{\text{г}}}$ – універсальна газова стала, P – місцевий статичний тиск, T – місцева температура,

y_v – масова частка пари,

μ_v – молярна маса пари,

y_g – масова частка газу, що не конденсується;

μ_g – молярна маса газу, що не конденсується.

Властивості розчиненого газу, що не конденсується, прирівнюються до властивостей повітря. За замовчуванням масову частку газу, що не конденсується, встановлено на рівні 10^{-4} . Це типові значення моделі, яке використовується в більшості випадків, але може бути змінено користувачем в діапазоні $10^{-3} \dots 10^{-5}$.

Масова частка пари y_v обчислюється чисельно з наступного нелінійного рівняння для повної ентальпії газорідинної суміші:

$$H = y_g h_g(T, P) + (1 - y_g - y_v) h_f(H, P) + \frac{I_c v^2}{2} + \frac{5}{2} k, \quad (7)$$

$$I_c = (\rho u_x)^2 + (\rho u_y)^2 + (\rho u_z)^2,$$

де T – температура суміші T є функцією тиску P та y_v .

h_g, h_f, h_v – ентальпії неконденсованого газу, рідини та пари, відповідно, k – турбулентна енергія,

I_c – квадратичний імпульс, визначений як:

$$I_c = (\rho u_x)^2 + (\rho u_y)^2 + (\rho u_z)^2.$$

Для оцінки режиму течії рідини крізь насадок застосовано визначення числа Рейнольдса, що характеризує гідродинамічні умови в потоці і стан рідини. Число Рейнольдса для рідини, що тече в циліндричній трубці і визначається рівнянням:

$$Re = \frac{VD\rho}{\mu}, \quad (8)$$

де V – середня швидкість потоку, м/с;

D – діаметр трубки, м;

μ – в'язкість, Па·с;

ρ – густина рідини, кг/м³.

В якості параметра для характеристики кавітаційних явищ в середині досліджуваних статичних кавітаторів використовувалось число кавітації χ , як один з найбільш важливих параметрів.

Кавітаційне число розраховували за формулою:

$$\chi = \frac{P - P_{\text{кав}}}{\frac{1}{2} \rho V^2}, \quad (9)$$

де P – тиск перед соплом, Па;

V – швидкість течії в соплі, м/с;

$P_{\text{кав}}$ – мінімальний тиск в потоці, Па.

Вважається, що при числах кавітації $\chi > 2$ кавітація відсутня, при значеннях χ від 1,0 до 2,0 кавітація має місце, а найбільша інтенсивність кавітації при $\chi < 1$.

Постановка завдання

З метою визначення кавітаційного впливу на зміну властивостей та складу води провести дослідження конструктивних параметрів кавітаційних насадків у SOLIDWORKS на характеристики потоку згідно числа кавітації з аналізом максимальної здатності перемішування потоку рідини для створення інтенсивних умов проведення окислювальних та водневих реакцій у реальних режимах роботи обладнання водопідготовки для тепломереж та отримати практичне підтвердження працездатності запропонованих рішень.

Результати та їх обговорення

В умовах турбулентного і кавітаційного режимів у системі відрізняється її енергетичний розподіл. У першому випадку введення в рідину енергії викликає її турбулентне перемішування і характеризується нерівномірною зміною швидкості з часом, що супроводжується інтенсивним перемішуванням рідини з пульсаціями швидкостей та тисків, спостерігаються поперечні переміщення та обертальні рухи окремих об'ємів рідини. Гідродинаміка у кавітаційному режимі є складнішою. При цьому поряд із утворенням у рідині великомасштабних пульсацій, як при турбулентному режимі, одночасно відбуваються дрібномасштабні пульсації, утворення і сплескування кавітаційних бульбашок, виникнення кумулятивних мікроструменів, зміна тисків і температур та інші кавітаційні ефекти.

Розрахунок числа Re для руху потоку через насадок дає можливість оцінити значення величини швидкостей і ступеня турбулізації. Із збільшенням діаметру трубки від 0,004 м до 0,012 м швидкість потоку зменшується, а число Рейнольдса збільшується. Подальше збільшення діаметру сопла призводить до поступового зменшення числа Re . Вважається, що чим вищим є число Рейнольда, тим меншим є розмір утворених кавітаційних пухирців і процес відбувається більш ефективно. Таким чином, збільшення діаметру сопла понад 0,012 м є недоцільним [40].

Тому для досліджень було прийнято внутрішній діаметр насадка 0,006 м. Було визначено число Рейнольда, яке характеризує виток рідини при даних умовах $Re = 33707$, згідно якого можна зробити висновок, що режим течії турбулентний ($Re < 2320$ режим вважається ламінарним, при $Re > 2320$ – турбулентним).

Для конструкції гідродинамічного кавітаційного реактора важливо зафіксувати параметри роботи: швидкість, тиск та число кавітації, що впливають на процес. Виникнення та ступінь кавітації через пристрій, як вже вказано вище, прогнозується за допомогою безрозмірного числа, яке називається числом кавітації χ , на яке сильно впливають характеристики кавітаційного пристрою, включаючи діаметр, коефіцієнт тиску та його геометрію.

Виходячи з аналізу літературних джерел, для досліджень було визначено та застосовано найбільш прийнятні для здійснення процесу основні конфігурації статичних кавітаторів за технологічністю їх виготовлення та процесами які в них виникають (рис. 2).

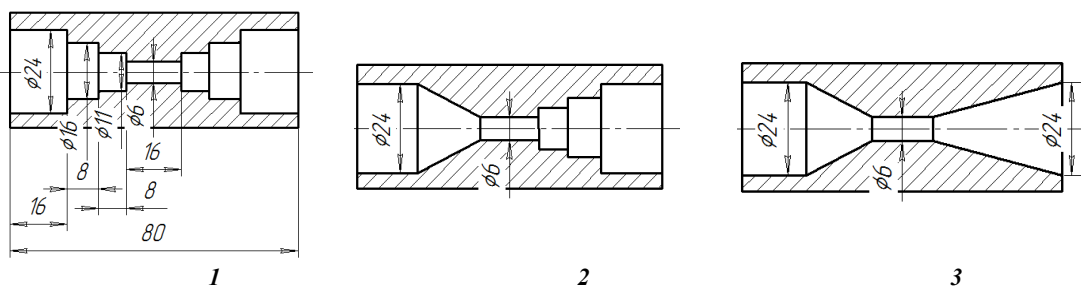


Рис. 2. Конструкції кавітаторів: 1 – ступеневий на вході та виході; 2 – конфузорийний на вході та ступеневий на виході; 3 – конфузорно-дифузорийний

У результаті проведених досліджень моделювання кавітаційних процесів у SOLIDWORKS в різних, за конструктивними особливостями, статичних кавітаторів було отримано траєкторії руху шарів рідини при проходженні крізь кавітатори та картину розподілу величини тиску у різних точках кавітаторів.

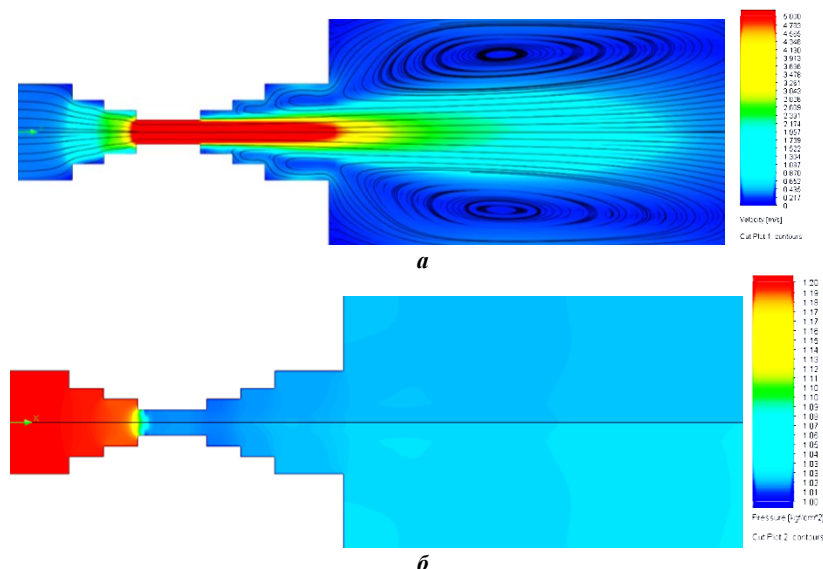


Рис. 3. Результати моделювання течії рідини крізь насадок при вхідному тиску 0,12 МПа: а – траєкторії руху шарів рідини; б – картина розподілу величини тиску

Проведений аналіз розподілу швидкостей у насадку ступеневого на вході та виході при зміні вхідного тиску показав, що збільшення вхідного тиску призводить до збільшення швидкості у центральній зоні потоку та збільшення довжини струменя із зберіганням максимальної швидкості (рис. 4) та виникненням зон активного перемішування рідини на виході з насадка.

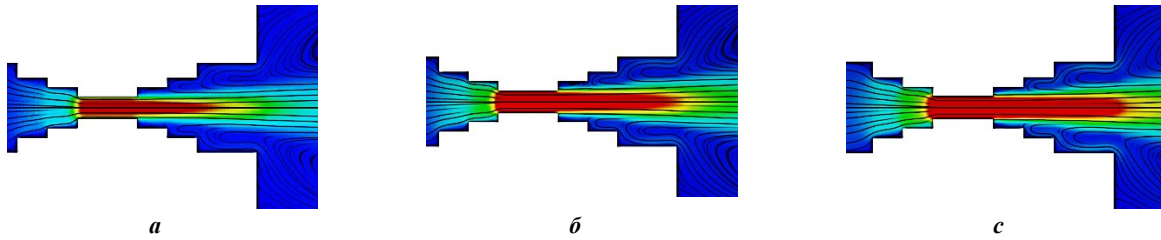


Рис. 4. Результати моделювання течії рідини крізь насадку при зміні вхідному тиску: *a* – траєкторії руху шарів рідини при тиску 0,12 МПа; *б* – траєкторії руху шарів рідини при тиску 0,14 МПа; *с* – траєкторії руху шарів рідини при тиску 0,16 МПа

На рис. 5 показано у збільшеному форматі зміну тиску у різних зонах насадка та картину коливань тиску по довжині насадка. На вході у насадок при його звуженні йде падіння швидкості потоку та спостерігається зона пониженого тиску 3 де виникають кавітаційні пухирці та пульсації тиску по каналу насадка 4, що говорить про турбулентну течію потоку рідини.

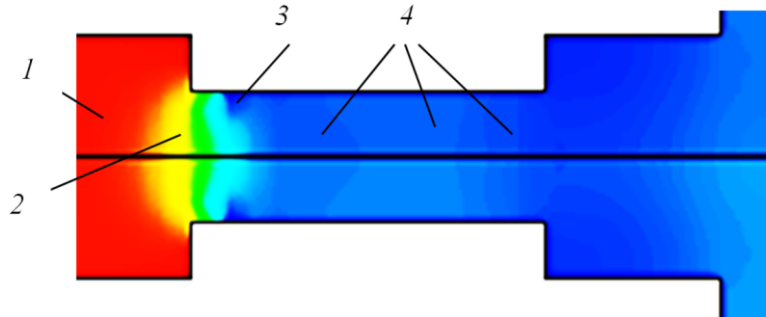


Рис. 5. Результати моделювання течії рідини крізь насадок: 1 – вихідний тиск 0,12 МПа; 2 – тиск на вході у насадок 0,118 МПа; 3 – тиск у кавітаційній каверні 0,01 МПа; 4 – пульсації тиску

На рис. 6 наведено результати моделювання руху рідини крізь насадок конфузорний на вході та ступеневий на виході, а на рис. 7 конфузорно-дифузорний при вхідному тиску 0,12 МПа.

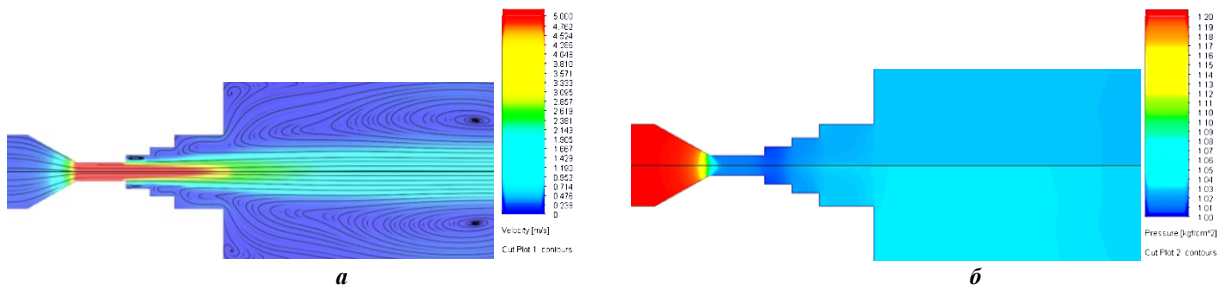


Рис. 6. Результати моделювання течії рідини крізь насадок конфузорний на вході та ступеневий на виході при вхідному тиску 0,12 МПа: *a* – траєкторії руху шарів рідини; *б* – картина розподілу величини тиску

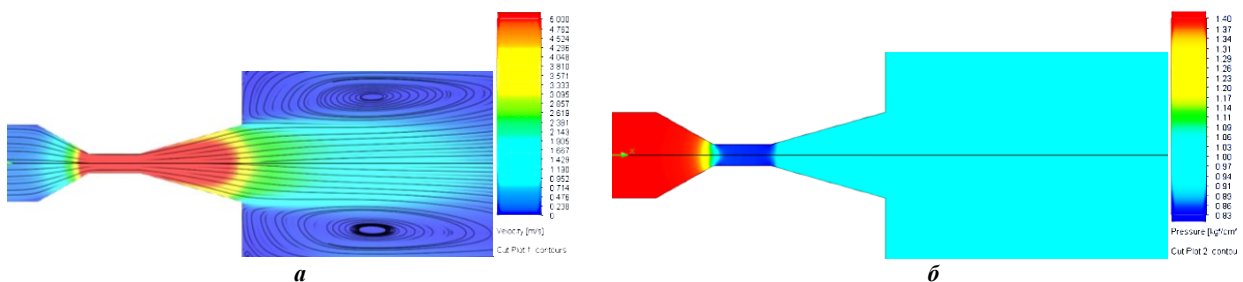


Рис. 7. Результати моделювання течії рідини крізь насадок конфузорно-дифузорний при вхідному тиску 0,12 МПа: *a* – траєкторії руху шарів рідини; *б* – картина розподілу величини тиску

У результаті проведених досліджень впливу величини вхідного тиску на характеристики кавітаційних явищ у насадках було побудовано графік залежності числа кавітації для досліджуваних насадків від тиску на вході.

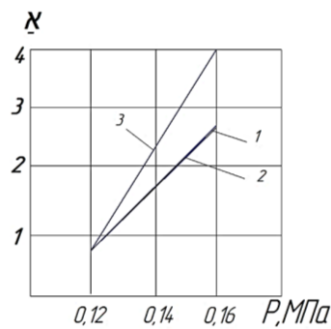


Рис. 8. Результати залежності числа кавітації для досліджуваних насадків від тиску на вході: 1 – ступеневий на вході та виході; 2 – конфузорний на вході та ступеневий на виході; 3 – конфузорно-дифузійний

З отриманих результатів моделювання течії рідини крізь насадки встановлено, що найбільший кавітаційний вплив здійснюється згідно розрахункового числа кавітації (рис. 8) при вхідному тиску 0,12 МПа. Найкращий ефект перемішування рідини на виході з насадки отримано у насадку ступеневому на вході та виході і в насадку конфузорному на вході та ступеневому на виході. З точки зору технології виготовлення більш технологічним за виготовленням є насадок ступеневий на вході та виході, який було застосовано в експериментальному обладнанні рис. 9.

Обладнання виготовлено з можливістю застосування індивідуально окремих блоків, а саме гідростатичного кавітатора, блока омагнічування, вібраційного кавітатора та застосування їх в комплексі. В експериментальному обладнанні для підготовки водопровідної води для котельень було застосовано статичний кавітатор 4 (рис. 9) з насадком ступеневим на вході та виході та вібраційний кавітатор 1. З метою впливу на склад водопровідної води також постійного магнітного поля на трубопровід напірний 9 було застосовано вузол омагнічування 3 із змінною індукцією вздовж осі каналу проходження води. При включенні електродвигуна насос 6 подає воду з бака 2 крізь трубопровід 7 у систему. Величина тиску регулюється за допомогою кранів 10 та 11 і контролюється манометром 5. Додатково включається вібраційний кавітатор 1 для збільшення кавітаційного впливу на стан води. За певний час рідина з бака отримує багатоциклічний вплив гідрокавітації та магнітного поля, що призводить до руйнування структурних і міжмолекулярних зв'язків, зміни її властивостей та складу. Практичне застосування впливу на склад водопровідної води оцінювалося зміною показників: рН, загальної мінералізації (показник – TDS), окислювального відновлювального потенціалу (ORP) та аналізом осаду який утворюється за часом після відстоювання (дві доби). Зміну показника рН з часом оброблення показано на графіку рис. 10.



Рис. 9. Загальний вигляд дослідної установки для зміни властивостей водопровідної води: 1 – вібраційний кавітатор; 2 – ємність з водою; 3 – вузол омагнічування статичним магнітним полем з градієнтом напруженості вздовж потоку рідини; 4 – статичний кавітатор; 5 – манометр; 6 – насос з електродвигуном; 7 – трубопровід від бака до насоса; 8 – зливний трубопровід від насоса до бака; 9 – трубопровід напірний

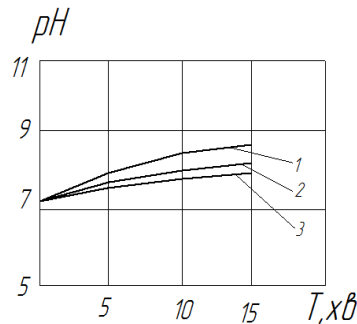


Рис. 10. Графік залежності показника рН водопровідної води за часом оброблення: 1 – комплексна дія гідрокавітації у статичному кавітаторі, та вібраційному кавітаторі з омагнічуванням потоку статичним магнітним полем з градієнтом напруженості вздовж потоку рідини; 2 – гідрокавітація у статичному кавітаторі; 3 – омагнічування статичним магнітним полем з градієнтом напруженості вздовж потоку рідини

Отримані результати (рис. 10) показують, що вплив гідрокавітації у статичному кавітаторі та вплив магнітного поля мають окрему дію на молекули води. Відомі гіпотези [39] стверджують, що омагнічування постійним магнітним полем з градієнтом напруженості вздовж потоку призводить до зміни кута нахилу водневих зв'язків. А кавітаційний вплив призводить до їх розриву з виділенням активних газів O_2 і H_2 , які призводять до хімічних реакцій з іонами заліза, кальцію та магнію.

Цей процес підтверджує вимірювання параметрів зміни окислювального відновлювального потенціалу (показник ORP) за часом оброблення зменшується, що говорить про насичення активним газом O_2 та зміною вмісту загальної мінералізації (показник – TDS) за часом (рис. 11) – зростання в процесі оброблення окислених домішок, а потім при відстоюванні йде зниження при випадінні в осадок та спливанні на поверхню емкості.

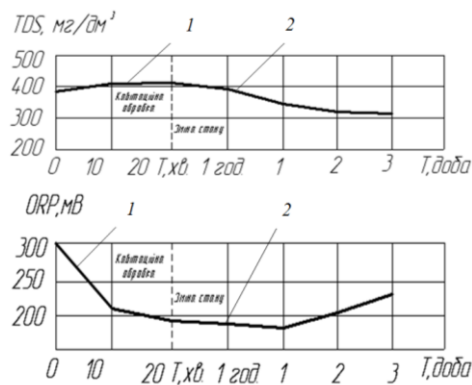


Рис. 11. Графік залежності зміни показників TDS та ORP водопровідної води за часом: 1 – в процесі оброблення; 2 – в процесі відстоювання

Для визначення зміни складу водопровідної води після оброблення були взяті проби із загального об'єму обробленої води у кількості 300 мл, які відстоювали 3 доби. Результати зміни складу водопровідної води після оброблення показані на рис.12. Встановлено, що окислені іони кальцію та магнію сплили на поверхню, а окислені іони заліза випали у осад на дно у вигляді пластивців, що підтверджує результати зменшення показника TDS.



Рис. 12. Результати комплексної дії гідрокавітації та омагнічування на зміну складу водопровідної води після відстоювання: 1 – кристали окислів кальцію та магнію, що сплили на поверхню; 2 – осад окислених іонів заліза у вигляді пластивців, осіли на дно ємності

Висновки

1. Більшість потоків рідини, що зустрічаються в інженерній практиці, є турбулентними з виникненням кавітаційного процесу, тому Flow Simulation було застосовано для моделювання та вивчення картини проходження потоку рідини крізь насадки різної конфігурації з визначенням основних їх характеристик. На

основі аналізу результатів моделювання процесу гідродинамічної кавітації були виготовлені і досліджувались кавітаційні насадки: ступеневий на вході та виході, конфузорний на вході та ступеневий на виході, конфузорно – дифузорний з такими геометричними параметрами: довжина горловини сопла 20 мм, діаметр горловини насадка в кавітаційних реакторах 6 мм.

2. На основі експериментальних даних було встановлено, що майже для всіх виготовлених зразків кавітаційних насадків характерно виникнення газової гідродинамічної кавітації та першої стадії паро-газової. Про це свідчать високі значення числа Рейнольдса і низькі значення числа кавітації. Найбільш раціональним є використання кавітаційного насадка ступеневого на вході та виході з діаметром горловини сопла 6 мм, який також показав найбільшу здатність перемішування потоку рідини на виході з нього при вхідному тиску 0,12 МПа.

3. Експериментальний статичний кавітаційний насадок, ступеневий на вході та виході, дозволяє ефективно перемішувати шари рідини та отримати руйнування структурних і міжмолекулярних зв'язків, зміни її властивостей та складу, що підтвердили експериментальні дослідження його застосування.

4. У результаті застосування комплексної дії гідрокавітації у статичному кавітаторі, та вібраційному кавітаторі з омагнічуванням потоку статичним магнітним полем з градієнтом напруженості вздовж потоку рідини отримано створення інтенсивних умов проведення окислювальних та водневих реакцій у реальних режимах роботи обладнання водопідготовки, що показали зміни параметрів окислювального відновлювального потенціалу за часом оброблення та зміною показника вмісту загальної мінералізації за часом, а також показника рН водопровідної води за часом оброблення.

5. Одержані результати були використані у розробленні рекомендацій для проектування ефективного обладнання водопідготовки для теплотрасс на першому етапі, що дасть можливість зменшити навантаження на обладнання при застосуванні мембранних технологій – зворотного осмосу та ультрафільтрації на другому етапі.

Література

1. Долінський А. А., Авдєєва Л. І., Макаренко А. А. Кавітаційні технології виробництва нанопрепаратів. Київ: Думка. 2020. 112 с.
2. Adrien M., Bronson B.M., Xu Zh., Liu Q. Study of Venturi tube geometry on the hydrodynamic cavitation for the generation of microbubbles. *Minerals Engineering*. V.132, 2019. pp. 268–274.
3. Авдєєва Л. Ю., Павлик В. Ю. Дослідження впливу ефектів гідродинамічної кавітації на властивості складних багатокомпонентних систем. *Теплофізика та теплоенергетика*, 2022, т. 44, №2. С. 21–28.
4. Carpenter, J., Badve, M., Rajoriya, S., George, S., Saharan, V. K., & Pandit, A. B. Hydrodynamic cavitation: an emerging technology for the intensification of various chemical and physical processes in a chemical process industry. *Reviews in Chemical Engineering*, 33(5). 2017. pp.433–468.
5. Інноваційні нанотехнології активації і знезаражування води та вібраційне обладнання [Р. І. Сілін, А. І. Гордєєв, Г. Б. Параска, В. Д. Пархоменко, В. В. Кравчук] Хмельницький: ХмЦНП, 2013. 252 с., іл.
- 6 / 8. Кавітаційний змішувач: пат. 99791 Україна, МПК B01F 3/00. № u201413909; заявл 25.12.2014; опубл. 25.06.2015, бюл. № 12.
7. Кавітаційний змішувач: пат. 99790 Україна, МПК B01F 3/00, C12M 1/00, C12M 1/33 (2006.01). № u201413908; заявл 25.12.2014; опубл. 25.06.2015, бюл. № 12.
8. Кавітаційний апарат: пат. 51798 Україна, МПК B01F 3/00, D21B 1/00. № u201003840; заявл 02.04.2010; опубл. 26.07.2010, бюл. № 14.
9. Кавітаційний змішувач: пат. 52855 Україна, МПК B01F 5/00. № 2000031295; заявл. 06.03.2000; опубл. 15.01.2003, бюл. № 1.
10. Спосіб керування процесом кавітаційного змішування і кавітаційний змішувач: пат. 52856 Україна, МПК B01F 5/00. № 2000031296; заявл. 06.03.2000; опубл. 15.01.2003, бюл. № 1.
11. Кавітаційний змішувач: пат. 41126 Україна, МПК B01F 5/00. №u200812866; заявл. 04.11.2008; опубл. 12.05.2009, бюл. № 9.
12. Кавітаційний змішувач: пат. 31086 Україна, МПК B01F 5/00. № u200713165; заявл. 27.11.2007; опубл. 25.03.2008, бюл. № 6.
13. Кавітаційний змішувач проточного типу: пат. 11842 Україна, МПК B01F 5/00. № u200506265; заявл. 24.06.2005; опубл. 16.01.2006, бюл. № 1.
14. Cavitating jet: pat. US 2003/0047622 A1 USA, Int. Cl. B05B 1/26. № 10/220,005, 26.01.2001; 13.03.2003.
15. Кавітаційний змішувач: пат. 54917 Україна, МПК(2009) B01F 3/00, C12M 1/00, C12M 1/33. № u201007155; заявл. 09.06.2010; опубл. 25.11.2010, бюл. № 22.
16. Кавітаційний змішувач: пат. 1398 Україна, МПК B01F 5/00. № 93250341; заявл. 02.02.1993; опубл. 25.03.1994, бюл. № 1.
17. Кавітаційний змішувач: пат. 108597 Україна, МПК B01F 3/00, B01F 5/00. № u201600326; заявл. 15.01.2016; опубл. 25.07.2016, бюл. № 14.
18. Кавітаційний змішувач: пат. 68821 Україна, МПК B01F 3/0. № u201111923; заявл. 11.10.2011; опубл. 10.04.2012, бюл. № 7.
19. Кавітаційний змішувач: пат. 106510 Україна, МПК B01F 3/00. №u201511177; заявл. 13.11.2015; опубл. 25.04.2016, бюл. № 8.

20. Кавітаційний змішувач: пат. 50231 Україна, МПК B01F 5/00. №u200913413; заявл. 23.12.2009; опубл. 25.05.2010, бюл. № 10.
21. Кавітаційний змішувач: пат. 1399 Україна, МПК B01F 5/00. №93250342; заявл. 08.02.1993; опубл. 25.03.1994, бюл. № 1.
22. Кавітаційний змішувач: пат. 1017 Україна, МПК B01F 5/00, D21B 1/00. № 93230168; заявл. 08.02.1993; опубл. 30.12.1993, бюл. № 3.
23. Кавітаційний змішувач: пат. 69124 Україна, МПК B01F 5/00, D21B 1/00. № 20031211178; заявл. 16.08.2004; опубл. 16.08.2004, бюл. № 8.
24. Кавітаційний змішувач: пат. 1397 Україна, МПК B01F 5/00. №93250340; заявл. 02.02.1993; опубл. 25.03.1994, бюл. № 1.
25. Кавітаційний апарат: пат. 52910 Україна, МПК B01F 3/00. № u201004377; заявл. 14.04.2010; опубл. 10.09.2010, бюл. № 17.
26. Кавітаційний змішувач: пат. 70660 Україна, МПК B01F 5/00. №u201112959; заявл. 04.11.2011; опубл. 25.06.2012, бюл. № 12.5.
27. Кавітаційний змішувач: пат. 30486 Україна, МПК B01F 5/00. № 98052486; заявл. 13.05.1998; опубл. 15.11.2000, бюл. № 6.
28. Cavitation mixer: pat. US 2003/0147303 A1 USA, Int. Cl. B05B 5/08 №10/220,097, 28.02.2001; Pub. date 07.08.2003.
29. Multi-chamber supercavitation reactor: pat. US 2007/0189114 A1 USA, Int. Cl. B01F 5/08, B01J 19/26. № 11/679,665, 27.02.2007; Pub. date 16.08.2007.
30. Cavitation mixer or stabilizer: pat. US 2007/0041266 A1 USA, Int. Cl. B01F 3/08, B01F 5/04. № 11/499,453, 04.08.2006; Pub. date 22.02.2007.
31. Проточно-кавітаційний змішувач: пат. 44179 Україна, МПК B01F 5/00, 01F7/04, 21B1/36. № 2001064151; заявл. 15.06.2001; опубл. 15.01.2002, бюл. № 1.
32. Генератор кавітації: пат. 64225 Україна, МПК F02M 33/00. № 2003043076; заявл. 08.04.2003; опубл. 16.02.2004, бюл. № 2.
33. Yunhua, J., Tao B., Ye G. Formation and steady flow characteristics of ventilated supercavity with gas jet cavitator. *Ocean Engineering*. 2017. Vol. 142. pp. 87–93.
34. Byoung-Kwon, Ahn., Tae-Kwon Lee, Hyoung-Tae Kim, Chang-Sup. Lee Experimental investigation of supercavitating flows. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*. 2012. Vol. 4, iss. 2. pp. 123 – 131.
35. Pendar M., Roohi E. Investigation of cavitation around 3D hemispherical head-form body and conical cavitators using different turbulence and cavitation models. *Ocean Engineering*. 2016. Vol. 112. P.287–306.
36. Ye-jun, G., Jie-min Zh., Tian-zeng L. Numerical investigation of the effect of rotation on cavitating flows over axisymmetric cavitators. *Journal of hydrodynamics*. 2016. Vol. 28, iss. 3. pp. 431 – 441.
37. Ebrahim, K., Erfan K., Khodayar J., Seyyed Morteza J. The investigation of natural super-cavitation flow behind three- dimensional cavitators: Full Cavitation Model. *Applied Mathematical Modelling*. 2017. Vol. 45. pp. 165 –178.
38. Young Kyun Kwack, Kyun Kwack, Sung Ho Ko. Numerical analysis for supercavitating flows around axisymmetric cavitators. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*. 2013. Vol. 5, iss. 3. pp. 325 – 332.
39. Badve, M. P., Alpar, T., Pandit, A. B., Gogate, P. R., & Csoka, L. Modeling the shear rate and pressure drop in a hydrodynamic cavitation reactor with experimental validation based on KI decomposition studies. *Ultrasonics & Sonochemistry*, 22. 2015. pp. 272-277.
40. Целень Б. Я., Столітня Н. В. Вплив способу дискретно-імпульсного введення енергії на pH кислого розчину. *Міжнародний науковий журнал «Інтернаука». Технічні науки*. № 6 (28), 2017. С. 72–77.
41. Šarc A., Stepišnik-Perdih T., Petkovšek M., & Dular M. The issue of cavitation number value in studies of water treatment by hydrodynamic cavitation. *Ultrasonics sonochemistry*, 34. 2017. pp. 51–59.

References

1. Dolinsky A. A., Avdeeva L. I., Makarenko A. A. Cavitation technologies for the production of nanopreparations. Kyiv: Nauk. Dumka. 2020. 112 p.
2. Adrien M., Bronson B. M., Xu Zh., Liu Q. Study of Venturi tube geometry on the hydrodynamic cavitation for the generation of microbubbles. *Minerals Engineering*. V.132, 2019, pp. 268–274.
3. Avdeeva L. Yu., Pavlyk V. Yu. Study of the influence of hydrodynamic cavitation effects on the properties of complex multicomponent systems. *Thermophysics and Heat Power*, 2022, vol. 44, № 2. pp. 21–28.
4. Carpenter, J., Badve, M., Rajoriya, S., George, S., Saharan, V. K., & Pandit, A. B. Hydrodynamic cavitation: an emerging technology for the intensification of various chemical and physical processes in a chemical process industry. *Reviews in Chemical Engineering*, 33(5). 2017. P. 433–468.
5. Innovative nanotechnologies of water activation and disinfection and vibration equipment [R. I. Silin, A. I. Gordeev, G. B. Paraska, V. D. Parkhomenko, V. V. Kravchuk] Khmelnytsky: KhmTSNII, 2013. 252 p., ill.
6. Cavitation mixer: pat. 99791 Ukraine, MPK B01F 3/00. № u201413909; application 25.12.2014; publ. 25.06.2015, bull. № 12.
7. Cavitation mixer: pat. 99790 Ukraine, MPK B01F 3/00, C12M 1/00, C12M 1/33. № u201413908; application 25.12.2014; publ. 06/25/2015, bull. № 12.
8. Cavitation apparatus: Pat. 51798 Ukraine, MPK B01F 3/00, D21V 1/00. № u201003840; application 04/02/2010; publ. 07/26/2010, bull. № 14.

9. Cavitation mixer: Pat. 52855 Ukraine, MPK B01F 5/00. № 2000031295; application 03/06/2000; publ. 01/15/2003, bull. № 1.
10. Method of controlling the cavitation mixing process and cavitation mixer: Pat. 52856 Ukraine, MPK B01F 5/00. № 2000031296; appl. 06.03.2000; publ. 15.01.2003, bull. № 1.
11. Cavitation mixer: pat. 41126 Ukraine, MPK B01F 5/00. № u200812866; appl. 04.11.2008; publ. 12.05.2009, bull. № 9.
12. Cavitation mixer: pat. 31086 Ukraine, MPK B01F 5/00. № u200713165; appl. 27.11.2007; publ. 25.03.2008, bull. № 6.
13. Cavitation mixer of flow type: pat. 11842 Ukraine, MPK B01F 5/00. № u200506265; appl. 24.06.2005; publ. 16.01.2006, bull. № 1.
14. Cavitating jet: pat. US 2003/0047622 A1 USA, Int. Cl. B05B 1/26. № 10/220,005, 26.01.2001; 13.03.200.
15. Cavitation mixer: pat. 54917 Ukraine, MPK B01F 3/00, C12M 1/00. № u201007155; appl. 09.06.2010; publ. 25.11.2010, bull. № 22.
16. Cavitation mixer: Pat. 1398 Ukraine, MPK B01F 5/00. № 93250341; appl. 02.02.1993; publ. 25.03.1994, bull. № 1.
17. Cavitation mixer: Pat. 108597 Ukraine, MPK B01F 3/00, B01F 5/00. № u201600326; appl. 15.01.2016; publ. 25.07.2016, bull. № 14.
18. Cavitation mixer: Pat. 68821 Ukraine, MPK B01F 3/00. № u201111923; appl. 11.10.2011; publ. 10.04.2012, bull. № 7.
19. Cavitation mixer: pat. 106510 Ukraine, MPK B01F 3/00. № u201511177; appl. 13.11.2015; publ. 25.04.2016, bull. № 8.
20. Cavitation mixer: pat. 50231 Ukraine, MPK B01F 5/00. № u200913413; appl. 23.12.2009; publ. 25.05.2010, bull. № 10.
21. Cavitation mixer: pat. 1399 Ukraine, MPK B01F 5/00. № 93250342; appl. 08.02.1993; publ. 25.03.1994, bull. № 1.
22. Cavitation mixer: pat. 1017 Ukraine, MPK B01F 5/00, D21B 1/00. № 93230168; appl. 08.02.1993; publ. 30.12.1993, bull. № 3.
23. Cavitation mixer: pat. 69124 Ukraine, MPK B01F 5/00, D21B 1/00. № 20031211178; appl. 16.08.2004; publ. 16.08.2004, bull. № 8.
24. Cavitation mixer: pat. 1397 Ukraine, MPK B01F 5/00. № 93250340; appl. 02.02.1993; publ. 25.03.1994, bull. № 1.
25. Cavitation apparatus: pat. 52910 Ukraine, MPK B01F 3/00. № u201004377; appl. 14.04.2010; publ. 09/10/2010, bull. № 17.
26. Cavitation mixer: pat. 70660 Ukraine, MPK B01F 5/00. № u201112959; appl. 11/04/2011; publ. 06/25/2012, bull. № 12.5.
27. Cavitation mixer: pat. 30486 Ukraine, MPK B01F 5/00. № 98052486; appl. 05/13/1998; publ. 11/15/2000, bull. № 6.
28. Cavitation mixer: pat. US 2003/0147303 A1 USA, Int. Cl. B05B 5/08 № 10/220,097, 28.02.2001; Pub. date 07.08.2003.
29. Multi-chamber supercavitation reactor: rat. US 2007/0189114 A1 USA, Int. Cl. B01F 5/08, B01J 19/26. № 11/679,665, 27.02.2007; Pub. date 16.08.2007.
30. Cavitation mixer or stabilizer: rat. US 2007/0041266 A1 USA, Int. Cl. B01F 3/08, B01F 5/04. № 11/499,453, 04.08.2006; Pub. date 22.02.2007.
31. Flow-cavitation mixer: pat. 44179 Ukraine, MPK B01F 5/00, B01F 7/04, D21B 1/36. № 2001064151; appl. 15.06.2001; publ. 15.01.2002, bull. № 1.
32. Cavitation generator: pat. 64225 Ukraine, MPK F02M 33/00. № 2003043076; appl. 08.04.2003; publ. 16.02.2004, bull. № 2.
33. Yunhua, J., Tao B., Ye G. Formation and steady flow characteristics of ventilated supercavity with gas jet cavitator. *Ocean Engineering*. 2017. Vol. 142. pp. 87–93.
34. Byoung-Kwon, Ahn., Tae-Kwon Lee, Hyoung-Tae Kim, Chang-Sup. Lee Experimental investigation of supercavitating flows. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*. 2012. Vol. 4, iss. 2. pp. 123 – 131.
35. Pendar M., Roohi E. Investigation of cavitation around 3D hemispherical head-form body and conical cavitators using different turbulence and cavitation models. *Ocean Engineering*. 2016. Vol. 112. pp. 287–306.
36. Ye-jun, G., Jie-min Zh., Tian-zeng L. Numerical investigation of the effect of rotation on cavitating flows over axisymmetric cavitators. *Journal of hydrodynamics*. 2016. Vol. 28, iss. 3. pp. 431–441.
37. Ebrahim, K., Erfan K., Khodayar J., Seyyed Morteza J. The investigation of natural super-cavitation flow behind three-dimensional cavitators: Full Cavitation Model. *Applied Mathematical Modeling*. 2017. Vol. 45. pp. 165–178.
38. Young Kyun Kwack, Kyun Kwack, Sung Ho Ko. Numerical analysis for supercavitating flows around axisymmetric cavitators. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*. 2013. Vol. 5, iss. 3. pp. 325 – 332.
39. Badve, M. P., Alpar, T., Pandit, A. B., Gogate, P. R., & Csoka, L. (2015). Modeling the shear rate and pressure drop in a hydrodynamic cavitation reactor with experimental validation based on KI decomposition studies. *Ultrasonics & Sonochemistry*, 22. 2015. 272-277.
40. Tselen B. Ya., Stolitnya N. V. Influence of the method of discrete-pulse energy input on the pH of an acidic solution. *International scientific journal «Internauka». Technical sciences*. № 6 (28), 2017. pp. 72–77.
41. Šarc A., Stepišnik-Perdih T., Petkovšek M., & Dular M. The issue of cavitation number value in studies of water treatment by hydrodynamic cavitation. *Ultrasonics sonochemistry*, 34. 2017. pp. 51–59.