

ОСОБЛИВОСТІ КАВІТАЦІЙНОЇ ОБРОБКИ РІДИНИ В УМОВАХ ВИХРОВОЇ ВІДЦЕНТРОВОЇ СТРАТИФІКАЦІЇ ПОТОКУ

Рассмотрены особенности кавитационных процессов в условиях вихревого центробежного поля давления при обработке жидкостей с целью разрушения биологических загрязнителей низкой плотности. Приведены результаты исследования распределения градиентного поля давления путем анализа работы кавитационного реактора вихревого типа с использованием пакетов программ САПР SolidWorks Flow Simulation.

The peculiarities of cavitations processes in the conditions of pressure vortex centrifugal field during liquid treatment with the aim of low density biological contaminants breakdown are considered. The investigation results of pressure gradient field distribution by analysis of vortex — like cavitations reactor with the use of program package CAE SolidWorks Flow Simulation are given.

Вступ

Кавітаційна обробка рідинних середовищ у наш час знаходить все більш широке застосування для вирішення значного кола задач. Використання гідродинамічних та теплофізичних ефектів кавітації сприяє механотермолізу структури води з появою вільних водневих зв'язків, диспергуванню, гомогенізації, прискоренню хімічних реакцій, видаленню домішок окремих елементів тощо.

Актуальнішою проблемою сучасного світу є очищення та знезараження стічних вод від бактеріологічних забруднювачів низької густини. Найчастіше з цією метою використовують відоме устаткування, що працює за методами ферментації та флотації.

Разом з тим попередній економічний аналіз дає змогу прогнозувати перспективність використання кавітаційних методів для очищення води, особливо кавітаційної обробки гідродинамічного типу. Так, за деякими експлуатаційними даними, витрати на кавітаційну очистку умовної одиниці об'єму питної води складають приблизно — \$162, ультрафіолетову обробку — \$261, хлорування — \$482, озонування — \$1600. Отже кавітаційне очищення є найдешевшим способом. Однак кавітаційні методи очищення стоків на сьогодні використовуються мало, через проблему забезпечення необхідної продуктивності обладнання при достатньому ресурсі його роботи. Особливої уваги заслуговують проблеми кавітаційної ерозії та інтенсивної корозії стінок активних зон реакторів внаслідок колапсу бульбашок.

Необхідно зазначити, що засоби сучасних систем автоматизованого проектування (САПР) і потужності комп'ютерної техніки дають можливість значно прискорити створення нових та вдосконалення існуючих конструкцій пристроїв для кавітаційної обробки рідин.

Аналіз попередніх досліджень

Відомо, що кавітація має руйнуючий вплив на клітини мікроорганізмів та бактерії. Причому встановлено вплив інтенсивності кавітаційних процесів на зростання мікроорганізмів. Так кавітація малої інтенсивності стимулює зростання організмів, а значної — припиняє. Крім того, зі збільшенням температури та часу впливу швидкість загибелі мікроорганізмів зростає [1].

Опубліковано достатню кількість робіт, в яких виявлено і аналітично визначено механізм колапсу кавітаційних бульбашок [2–6]. Очевидно, що вплив кумулятивних струминок внаслідок колапсу є руйнівним для клітин організмів та їх скупчень аналогічно, як і до твердих стінок.

На сьогодні відомо декілька видів гідродинамічної кавітації. Їх умовно поділяють на види: бульбашкова, плівкова, шнурова, розвинена (суперкавітація) тощо. Колапс бульбашок має найбільший руйнівний ефект в умовах парогазової бульбашкової кавітації, позаяк при менших об'ємах бульбашок інтенсивність руйнування стінок зростає.

Реалізація кавітаційних технологій очищення та знезараження стічних вод передбачає використання установок на базі кавітаційних реакторів [7, 8].

Метою даної роботи є дослідження за допомогою сучасних комп'ютерних технологій розподілу поля тиску в умовах вихрового руху рідини та визначення впливу відцентрового прискорення потоку на напрямок кумулятивної струминки колапсуєючої бульбашки.

У процесі виконання дослідження вирішувалися наступні задачі:

- розробка комп'ютерної моделі кавітаційного реактора вихрового типу;

- застосування програмного продукту *SolidWorks Flow Simulation* для визначення розподілу поля тиску в поперечних перерізах реактора;
- визначення орієнтації кумулятивної струминки у момент колапсу бульбашки у різних перерізах потоку;
- дослідження впливу величини витрати на розподіл тиску всередині реактора.

Теоретична частина

Відомо, що руйнування бульбашки під час кавітації призводить до локального збільшення температури поблизу точки руйнування, виникнення ударних хвиль із значними перепадами тиску, утворення кумулятивних струминок тощо. Початком виникнення кавітації вважають момент зниження тиску в рідині нижче рівня насиченої пари для рідини в конкретних умовах. Однак кавітаційні процеси на практиці виникали і на більш високих значеннях тиску завдяки впливу стінок, наявності твердих домішок чи мікробульбашок газу (так званих кавітаційних ядер).

Найпростішою, з точки зору математичного опису, є радіально-симетрична модель еволюції бульбашки в не обмеженій нестисливій рідині (рисунок 1).

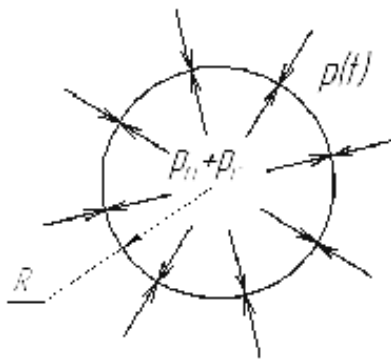


Рисунок 1 — Дія сил на поверхню бульбашки в стані рівноваги

Рівняння статичної рівноваги без врахування сил в'язкості в цьому випадку можна представити у вигляді

$$p + \frac{2\sigma}{R} = p_n + \frac{BT}{R^3}, \quad (1)$$

де p — тиск у навколишній рідині; σ — коефіцієнт поверхневого натягу; R — радіус бульбашки; p_n — тиск насиченої пари; B — стала, що залежить від маси газу в бульбашці; T — абсолютна температура.

За рівнянням Клайперона, тиск газу всередині бульбашки дорівнює

$$p_r = \frac{BT}{R^3}. \quad (2)$$

При змінному зовнішньому тиску, однаковому в усіх точках, рівняння для визначення зміни радіуса бульбашки за часом, що складено на основі рівноваги сил, прикладених до поверхні бульбашки, для політропного процесу зміни об'єму має вигляд [6]

$$\frac{dR}{dt} + \frac{3}{2R} R \frac{dR}{dt} = \frac{1}{\rho R} \left[p_0 \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3n} + p_v - \frac{2\sigma}{R} - \frac{4\mu}{R} \frac{dR}{dt} + p(t) \right], \quad (3)$$

де R, R_0 — поточне значення радіуса бульбашки та її початковий радіус; $\frac{dR}{dt}, \frac{d^2R}{dt^2}$ — перша та друга похідні за часом; p_0, p_v — початковий тиск у бульбашці та тиск насиченого пару рідини; n — показник політропи для парогазової суміші всередині бульбашки; σ — коефіцієнт поверхневого натягу рідини; μ — коефіцієнт в'язкості рідини; $p(t)$ — змінна величина тиску в рідині.

Наведене рівняння відображає взаємозв'язок між силами інерції з одного боку та силами тиску — з іншого. Сили тиску представлені як результат політропного процесу зміни об'єму бульбашки, поверхневого натягу та в'язкості рідини.

Вказаний вираз дає задовільні результати за умов: малого радіуса бульбашки, малої несиметрії зовнішніх тисків, малої швидкості руху границі тощо. Дана модель досить непогано досліджена, але реальний процес деформації бульбашки може значно відрізнятись, насамперед, несиметричністю.

На реальний процес деформації та колапсу кавітаційної бульбашки впливає: відстань до твердої поверхні; кількість інших бульбашок, їх розмір та концентрація; наявність граничного шару тощо. Тому врахування усіх факторів проблематичне. Досить добре досліджено, наприклад, модель деформації бульбашки поблизу стінки [9, 10]. Механізм колапсу за вказаною моделлю полягає в асиметричній деформації бульбашки з утворенням кумулятивної струминки у бік стінки (рисунок 2).



Рисунок 2 — Фази руйнування кавітаційної бульбашки у пристінному шарі

Кумулятивна струминка є одним з найпотужніших елементів динаміки руйнації мікропорожнини і викликає аномально високі локальні тиски, температури, швидкості та прискорення. Дослідні дані вимірних величин швидкостей сягають значень більше 100 м/с [11]. Вказана особливість є вагомим аргументом у поясненні причин кавітаційної ерозії стінок.

Виклад основного матеріалу дослідження

На практиці при виготовленні конструктивних елементів, що піддаються впливу кавітаційної ерозії, поверхню стінок у межах кавітаційних зон необхідно зміцнювати (наприклад, шляхом газотермічного напилення), що ускладнює виготовлення і не усуває повністю проблему. Більш раціональним захистом твердої поверхні від ерозії є видалення бульбашок від стінок на безпечну відстань. Таку

можливість, на наш погляд, дає створення відцентрового вихрового потоку рідини у зоні кавітаційного колапсу. За рахунок стратифікації потоків рідини не тільки за швидкістю, але й за густиною насичений бульбашками об'єм концентрується в осевій зоні реактора. Таким чином, відцентрові сили усередині рідини дають змогу додатково знизити тиск усередині потоку і захистити стінки реактора від руйнування.

Утворення відцентрового макровихору призводить до локального зниження тиску в центрі вихору. При цьому для лінійного кругового вихору тиск у центрі вихору радіуса r можна виразити залежністю

$$p_0 = p_r - \rho \left(\frac{r^2 \omega^2}{2} \right), \quad (4)$$

де p_r — тиск на границі кругового вихору; ρ — густина рідини; r — радіус вихору; ω — кутова швидкість крайньої точки.

У процесі комп'ютерного моделювання досліджувалася модель кавітаційного реактора вихрового типу [12, 13]. У якості програмного забезпечення для виконання моделювання роботи реактора використовувався пакет програм *SolidWorks Flow Simulation*. В основі математичної моделі САПР покладено рівняння Нав'є-Стокса, що описують у нестационарній постановці закони збереження маси, імпульсу та енергії середовища. Розрахункова програма використовує метод кінцевих об'ємів, і значення незалежних змінних розраховуються в центрі

комірок. Вказане програмне забезпечення вже випробувалося для вирішення задач проектування кавітаційних реакторів [12].

Основним завданням комп'ютерного моделювання було визначення розподілу тиску в потоці рідини, що проходить через вставку Вентурі при прямоточному русі та з попереднім тангенціальним закручуванням у равлик за сталих початкових умов. Зміни рівня тиску рідини досліджувалися у радіальному напрямку для окремих перерізів потоку з кроком 5 мм (рисунок 3).

У якості початкових умов моделювання гідродинамічних характеристик було задано:

- тиск на вході 0,473 МПа;
- тиск на виході 0,101 МПа (тиск навколишнього середовища);
- температура 293 К;
- робоча рідина вода;
- режим руху турбулентний.

Графіки тиску для кожного вказаного радіального перерізу вставки Вентурі зображено окремо для конфузора (рисунок 4) та дифузора (рисунок 5). На графіках цифрами на зносках вказано координату відповідного радіального перерізу.

Зображення зон з різним значенням густини, що відповідають концентрації бульбашок у потоці рідини всередині вставки Вентурі показано на рисунку 6 для прямого та вихрового руху, відповідно.

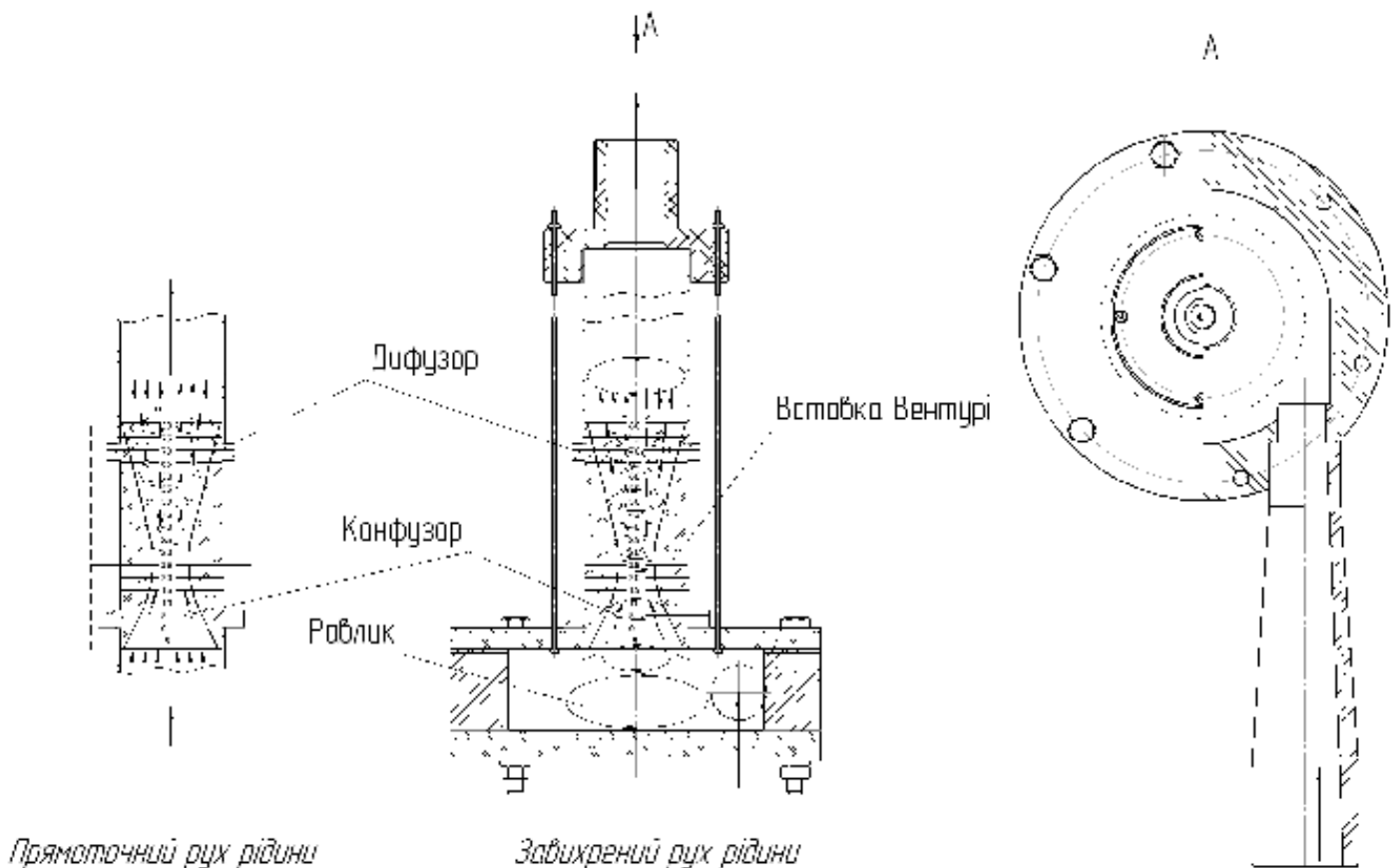


Рисунок 3 — Схема моделі для прямочного та вихрового руху рідини

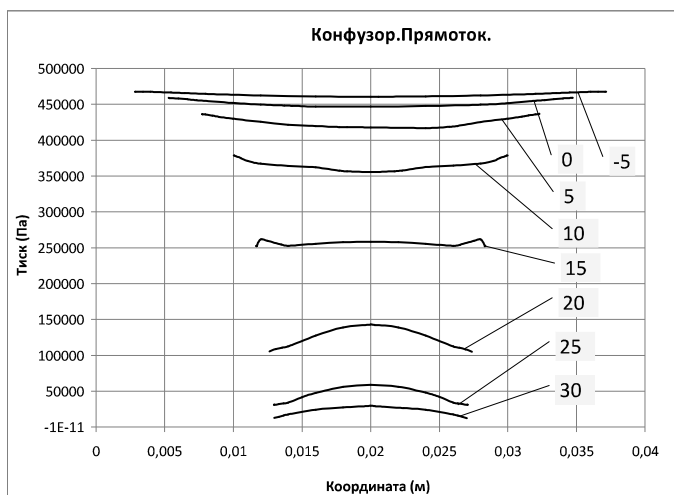
Аналіз залежностей, отриманих шляхом комп'ютерного моделювання, показує очевидну відмінність розподілу тиску всередині вставки Вентурі у прямоточному та завихреному потоці рідини. Так, при прямотоці на вході у конфузур (рисунок 4а) тиск рівномірно розподілений у перерізі «-5» і гідродинамічно знижується при звуженні. При цьому, в радіальному напрямку утворюється градієнт тиску з від'ємним напрямком у бік осі (переріз «10»). Надалі напрямок градієнта тиску змінюється в області перерізу «15» на зворотний, і в найвужчій частині має максимальне значення (перерізи «20»–«70» рисунок 5а). На виході з дифузору при стабілізації потоку напрямок градієнту тиску знову змінюється (перерізи «75»–«85»).

У випадку завихреного потоку (рисунок 4б) величина тиску в радіальних перерізах має постійну орієнтацію градієнту тиску з від'ємним напрямком до осі. Поступово, у

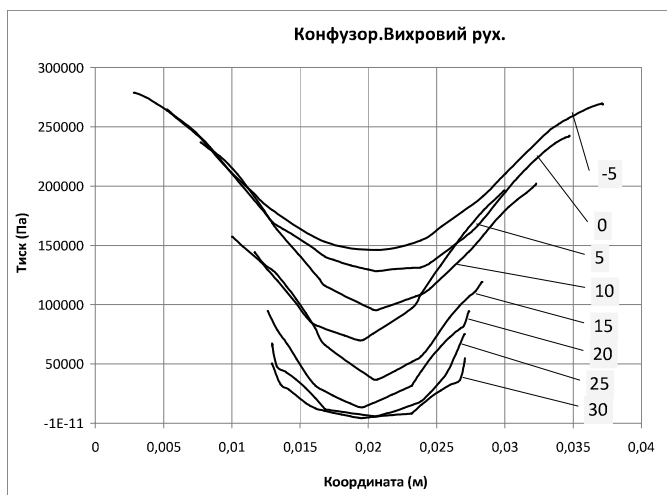
процесі стабілізації розподіл тиску стає більш рівномірним на виході з дифузору (рисунок 5б).

Таким чином, відцентрова сила, що виникає у штучно завихреному потоці рідини, призводить до перерозподілу тиску в радіальному напрямку, стратифікує компоненти рідини за густиною, створює вздовж всієї вставки Вентурі пристінний шар з тиском більшим, ніж у центрі та орієнтує градієнт тиску в бік осьової області. Останні два фактори без сумніву значно зменшують кавітаційну ерозію матеріалу стінок вставки Вентурі, тому що кількість кавітаційних бульбашок у пристінному шарі мінімальна, і кумулятивні струминки, що виникають при несиметричному їх колапсі, направлено у протилежний від стінки бік.

Розподіл потоку рідини за густиною в умовах завихрення (рисунок 6) також вказує на підвищену концентрацію бульбашок в осьовій зоні вставки на відміну від пристінних кавітаційних зон у прямотоці.

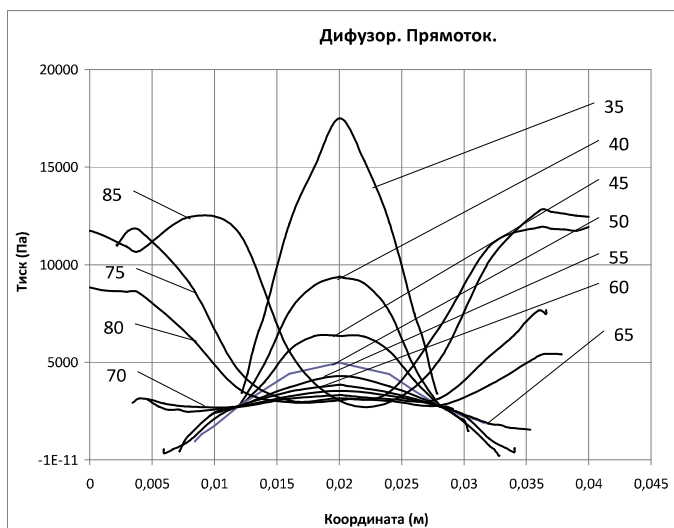


а)

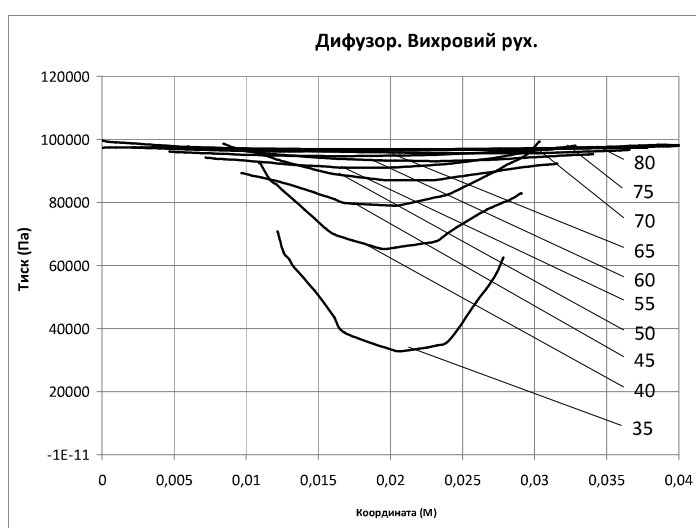


б)

Рисунок 4 — Графіки розподілу тисків в конфузурі при прямоточному (а) та вихровому (б) потоці рідини



а)



б)

Рисунок 5 — Графіки розподілу тисків в дифузурі при прямоточному (а) та вихровому (б) потоці рідини

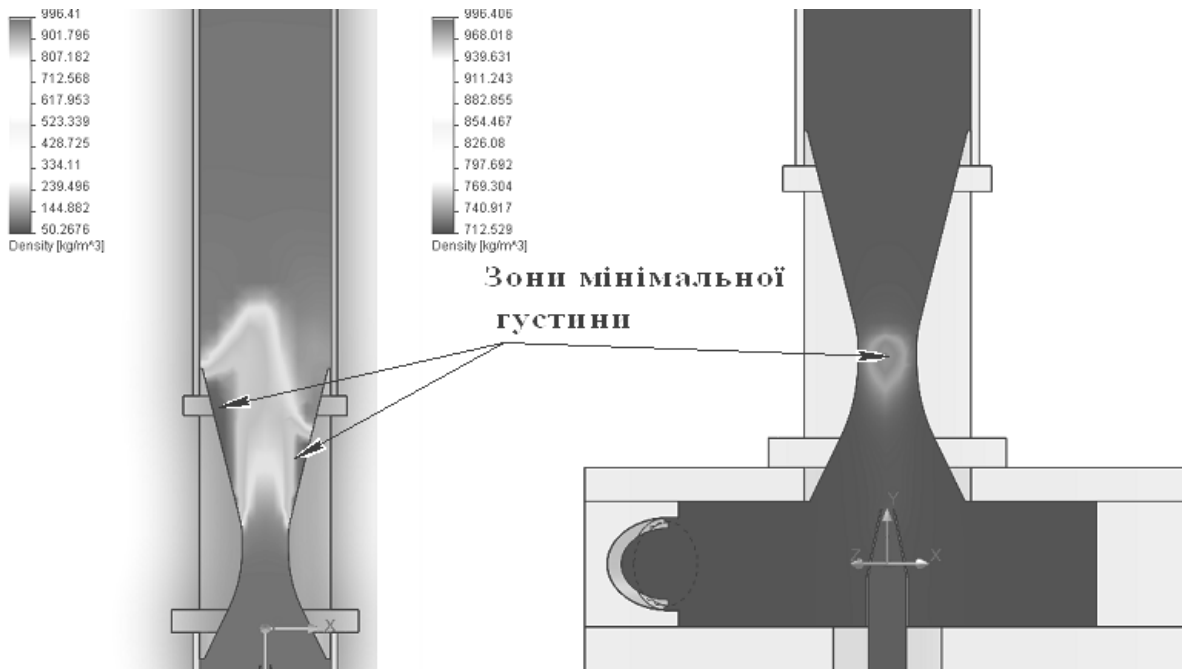


Рисунок 6 — Розподіл густини потоку всередині вставки Вентурі

Водночас необхідно відзначити суттєво менший об'єм кавітаційних областей за наявності завихрення та менше падіння тиску в них у порівнянні з прямою потоком при однакових перепадах тиску на вході-виході реактора. Це можна пояснити більш інтенсивною турбулізацією потоку та дисипативними процесами, що викликані додатковим примусовим завихренням.

Висновки

1. Використання САПР *SolidWorks Flow Simulation* у створенні об'ємних моделей хіміко-технологічних систем, а також моделювання термогідродинамічних процесів усередині їх, значно прискорює процес дослідження нових розробок за рахунок автоматизації розрахунків основних параметрів та візуалізації їх результатів.

2. Дослідження робочих параметрів потоку рідини за допомогою САПР *SolidWorks Flow Simulation* удосконаленої версії дає можливість моделювати можливі градієнтні поля у залежності від умов протікання рідини.

3. Візуалізація полів тиску, швидкості, температур та ліній току дає змогу виявити кавітаційні зони в потоці рідини, де густина рідинного середовища зменшується через наявність бульбашок.

4. Застосування гідродинамічної кавітації з накладанням примусового завихрення в технологіях водоочищення та знезараження значно підвищує ресурс роботи обладнання за рахунок зменшення величини кавітаційної ерозії стінок активних зон реактора.

Література

1. Пирсол, И.С. Кавитация. — М.: Мир, 1975 — 94 с.
2. Kling, C.L., Hammitt, F.O. A photographic study of sparcinduced cavitation — bubbl collapse // J. Basic Engang, Trans. A.S.M.E., D94, 1972.
3. Lauterborn, W., Bolle, H. Experimental investigations of cavitation — bubbl collapse in the neighbourhood of a solid boundary // J. Fluid Mech., 1975, vol. 72, p. 2.

4. Plesset, M.S., Chapman R.B. Collapse of an Initially Spherical Vapour Cavity in the Neighbourhood of a Solid Boundary // J. Fluid Mech., 1971, vol. 47, № 2. — P. 125—141.

5. Воинов, О.В., Воинов, В.В. О схеме захлопывания кавитационного пузырька около стенки и образования кумулятивной струйки. — ДАН СССР, 1976. — Т. 227. — № 4. — С. 63—66.

6. Иванов, А.И. Гидродинамика развитых кавитационных течений. — Л.: Судостроение, 1980. — 240 с.

7. Веретільник, Т.І., Матухно, О.В. Удосконалення технології очищення стічних вод із застосуванням ефектів кавітації // Промислова гідравліка і пневматика. — 2009. — С. 7—10.

8. Веретільник, Т.І., Яхно, О.М. Очистка сточных вод на Черкасском ОАО Азот с использованием эффектов кавитации // Вестник НТУУ «КПИ», Машиностроение. — 2007. — №51. — С. 87—93.

9. Воинов, О.В., Воинов, В.В. О схеме захлопывания кавитационного пузырька около стенки и образования кумулятивной струйки. — ДАН СССР, 1976. — Т. 227. — № 4. — С. 63—66.

10. Plesset M. S., Chapman R. B. Collapse of initially spherical vapour cavity in the neighbourhood of a solid boundary // J. Fluid Mech., 1971, vol. 47.

11. Маргулис, М.А. Основы звукохимии. — М.: Высшая школа, 1984. — 322 с.

12. Веретільник, Т.І., Циба, О.А., Щербина, М.О. Комп'ютерне моделювання роботи кавітаційного реактора з використанням засобів САПР Solid Works // Промислова гідравліка і пневматика. — 2010. — С. 45—50.

13. Патент 61789. Україна, МПКВ06В1/20. Вихровий кавітаційний реактор / Т.І. Веретільник, О.А. Циба, Ю.М. Дифучин, Р.Б. Капітан. — Заявл. 01.02.2011; Опубл. 25.07.2011. — Бюл. № 14.

Надійшла 14.12.2011