

Ю. В. Сухацький, З. О. Знак, Р. В. Мних
Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра хімії і технології неорганічних речовин

ЕНЕРГЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ РОБОТИ ГІДРОДИНАМІЧНОГО СТРУМЕНЕВОГО КАВІТАТОРА У ПРОЦЕСАХ ОЧИЩЕННЯ СТІЧНИХ ВОД ЗА КАВІТАЦІЙНО-ФЛОТАЦІЙНОЮ ТЕХНОЛОГІЄЮ

© Сухацький Ю. В., Знак З. О., Мних Р. В., 2015

Наведено результати енергетичного аналізу роботи гідродинамічного струменевого кавітатора. Встановлено залежність величини енергії, що виділяється внаслідок кавітації, від конструктивних параметрів сопел та їх просторової конфігурації. Виконано регресивний аналіз, який дає змогу оцінити вплив кожного з факторів (діаметра сопел та кута атаки струменів) на результативну величину теплової енергії у випадку використання різної кількості сопел. Показано, що найефективніше оброблення водного середовища досягається у разі використання 3-х сопел діаметром 1,6 мм за кута атаки струменів близько 50 градусів.

Ключові слова: стічні води, кавітація, флоатація, струменевий кавітатор, тепла енергія, сопло

The article presents the results of the energy analysis of a hydrodynamic jet cavitator. The dependency of the magnitude of energy released as a result of cavitation on the nozzle design parameters and their spatial configuration was defined. The authors performed the regression analysis, which allows for estimating the impact of each factor (the nozzle diameter and the angle of jets attack) on effective heat value in case of using different numbers of nozzles. It is shown, that the most effective treatment of the water environment is achieved when using 3 nozzles with a diameter of 1,6 mm at an angle of jets attack around 50 degrees.

Key words: wastewater, cavitation, flotation, jet cavitator, heat energy, nozzle

Вступ. Інтенсивна діяльність підприємств харчової та переробної галузей (м'ясо- та молокопереробні, олійні, виноробні тощо) супроводжується значними обсягами викидів висококонцентрованих за органічними забруднювачами стічних вод. Такі стічні води є полідисперсними системами і характеризуються високим вмістом жирів, солей карбонових кислот, завислих речовин, великими значеннями величин ХСК та БСК₅. Так, для м'ясопереробних підприємств вміст жирів у стоках сягає 500 мг/дм³ і більше, завислих речовин – 12 000 мг/дм³, ХСК і БСК₅ – понад 12 500 і 5100 мг/дм³ відповідно [1].

Очищення таких стічних вод традиційними методами (механічні, фізико-хімічні, біологічні) не забезпечує необхідного ступеня вилучення органічних забруднювачів, потребує використання значних доз високовартісних реагентів (коагулянти, флокулянти). Воно часто вимагає додаткових енерговитрат на перемішування реакційного середовища з метою збільшення площі контакту фаз, оскільки очищення зазвичай належить до гетерогенних процесів. Тому виникає гостра необхідність у пошуку нових методів, які самостійно чи у комбінації з вищезазначеними будуть використані для досягнення необхідного ступеня очищення стічних вод. Альтернативою традиційним методам є комплексні енергетичні впливи на стічні води як об'єкт, супутні ефекти яких і застосовують для очищення стоків.

На підставі попередніх досліджень запропоновано концепцію кавітаційно-флоатаційної технології очищення висококонцентрованих за органічними забруднювачами стічних вод [2], що

передбачає генерування кавітаційних бульбашок у гідродинамічному кавітаторі з їх подальшим використанням на стадії флоатації органічних забруднювачів. Гідродинамічна кавітація дає змогу обробляти значні обсяги стічних вод, рівномірно розподіляти енергію, що виділяється внаслідок колапсу бульбашок, за січенням кавітатора, запобігати утворенню застійних зон біля стінок реакційного обладнання, генерувати парогазові бульбашки заданого дисперсного складу, наслідком чого є повніше винесення утворених флотокомплексів на поверхню рідини вже під час флоатації.

Постановка задачі та огляд джерел літератури. Одним з найважливіших аспектів під час аналізу ефективності кавітаційного оброблення водного середовища є енергетичний. Ефективне введення енергії у водне середовище визначатиме концентрацію енергії у кавітаційному кластері, кількість утворених бульбашок, їх дисперсність і відповідно перебіг процесу флоатаційного вилучення забруднювачів, а, отже, впливатиме на техніко-економічні показники очищення стічних вод.

У літературі наведено чималу кількість типів кавітаторів та їх модифікацій. Однак наведені схеми кавітаторів або окремих їх вузлів, передусім кавітувальних елементів, переважно є лише принциповими. Відповідно вплив конструктивних параметрів кавітувальних елементів та їх просторового розташування на величину енергії, що виділяється внаслідок кавітації, у джерелах інформації висвітлено недостатньо. У роботі [3] наведено залежність інтенсивності кавітації, яку визначали за величиною сигналу давача, від конструктивних параметрів циліндричного кавітаційного сопла та сопла Вентурі. Як конструктивні параметри використовували довжину вузької частини сопла для циліндричного кавітаційного сопла і довжину та кут розкриття дифузornoї частини – для сопла Вентурі. Встановлено, що найбільшій інтенсивності кавітації у циліндричному кавітаційному соплі досягали у діапазоні довжин вузької частини сопла від 2 до 5 мм (екстремум величини сигналу давача спостерігали за довжини 3 мм). Для сопла Вентурі оптимальними параметрами, що забезпечують найбільшу інтенсивність кавітації в ньому, є такі: довжина дифузornoї частини – $4d$ (d – діаметр вузької частини сопла), кут розкриття – 40° . У гідродинамічному кавітаційному тепловому реакторі [4], який містить камеру гальмування потоків рідини, форсунок у вигляді ежекторів, встановлені назустріч одна одній і які забезпечують обертово-поступальний рух рідини, виникнення гідродинамічної кавітації відбувається у результаті гідроудару – зіткнення зустрічно направлених і протилежно закручених потоків рідини, що обертаються з великою швидкістю. Недоліком пристрою є руйнування його стінок та ежекторів внаслідок виникнення тертя та гідроудару. Разом з тим, обертово-поступальний рух рідини спричиняє утворення закручених потоків, що зумовлюють виникнення вихорів, які значно утруднюють розвиток бульбашкової кавітації. Зустрічне розташування форсунок обмежує просторову область існування кавітації, що зменшує час перебування у ній реагентів, а, отже, і ступінь їх перетворення. Вищезазначені чинники значно знижують ефективність використання підведеної до системи енергії.

Для ефективного підведення енергії до водного середовища необхідно створити умови, за яких максимально використовуватиметься кінетична енергія струменів рідкофазного середовища, а кавітаційна область виникатиме на певній віддалі від кавітувальних елементів, що унеможливить їх ерозію. Такий принцип збудження явища кавітації успішно реалізують у гідродинамічних струменевих кавітаторах [5].

Мета роботи. Мета роботи полягала у дослідженні залежності енергетичної ефективності роботи гідродинамічного струменевого кавітатора від конструктивних параметрів кавітувальних елементів (профільованих сопел) та їх просторового розташування і визначенні оптимальних умов підведення енергії до водного середовища.

Експериментальна частина. Дослідження впливу діаметра кавітувальних елементів (профільовані сопла), їх кількості та просторового розташування виконували на лабораторній установці, основним елементом якої був гідродинамічний струменевий кавітатор. Він складався з

кварцового корпусу, вузлів герметизації та системи профільованих сопел [2] з еквівалентним діаметром у діапазоні 1,6...3,1 мм. Початкові умови кавітаційного оброблення: температура вихідної води – 14 °С; об'єм води – 15 дм³; потужність приводу насоса – 1,1 кВт; тиск на вході у кавітатор – в межах 0,35...0,57 МПа; кількість сопел – 2–3; кут атаки струменів (кут між осями сопел) – 30..150 град. Впродовж досліду вимірювали витрату води у циркуляційному контурі та зміну її температури.

Ефективність роботи струменевого кавітатора оцінювали за кількістю теплової енергії (E), що виділяється внаслідок кавітації, та величиною енергетичного (теплового) коефіцієнта корисної дії ($ККД$):

$$E = cm\Delta T, \quad (1)$$

$$ККД = \frac{cm\Delta T}{W_n t} \cdot 100\%, \quad (2)$$

де c – теплоємність води, Дж/(кг·К); m – маса води у циркуляційному контурі, кг; ΔT – різниця температур на виході з кавітатора та у циркуляційній ємності, К; t – тривалість кавітаційного оброблення води, с; W_n – потужність приводу насоса, Вт ($W_n = 1100$ Вт).

Результати досліджень та їх обговорення. На основі експериментальних даних та розрахунку значень теплової енергії у системі автоматизованого проектування MathCad побудували залежності теплової енергії від: а – тиску на вході у кавітатор та кута атаки струменів (рис. 1, а, 2, а); б – діаметра сопел та кута атаки струменів (рис. 1, б, 2, б).

З отриманих графіків залежності кількості теплової енергії від тиску на вході у кавітатор і кута атаки струменів (поверхні на рис. 1, а, 2, а) видно, що із зростанням тиску на вході у кавітатор величина теплової енергії суттєво зростає в усьому діапазоні значень кута атаки струменів. Так, за діаметра сопла $d = 1,6$ мм із збільшенням тиску на вході у кавітатор від 0,35 до 0,57 МПа величина теплової енергії, що виділяється внаслідок кавітації, зростає від 1,2 до 1,52 МДж (на 27 %) за кута атаки 120 град. – для 2-х сопел; від 1,26 до 1,76 МДж (на 30 %) за кута атаки 50 град. – для 3-х сопел. Це зумовлено монотонним збільшенням швидкості води у профільованому соплі зі зростанням тиску на вході у кавітатор (табл. 1). Як відомо, кінетична енергія струменів пропорційна швидкості рідини у квадраті. Отже, зі збільшенням швидкості струменів зростає величина їх кінетичної енергії, а оскільки остання перетворюється на теплову, то й теплової енергії, що виділяється внаслідок колапсу кавітаційних парогазових бульбашок.

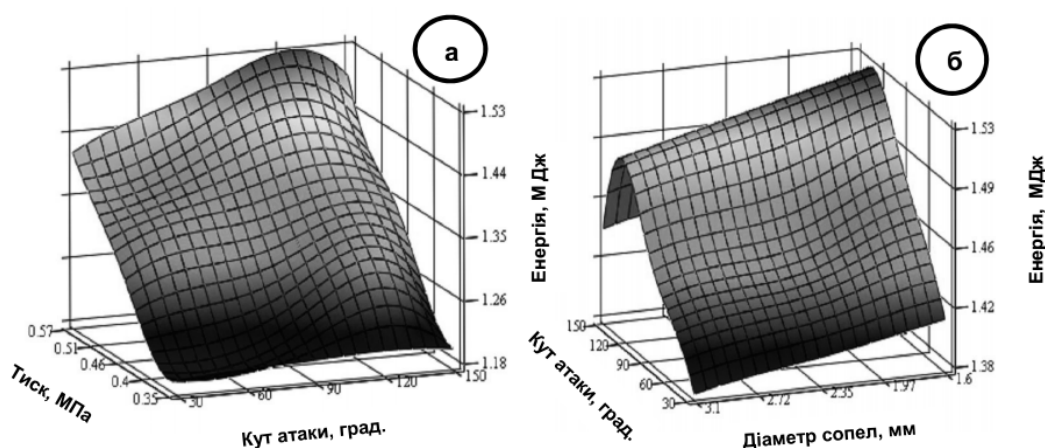


Рис. 1. Залежність теплової енергії від:
а – тиску на вході у кавітатор та кута атаки струменів ($d=1,6$ мм);
б – діаметра сопел та кута атаки струменів (кількість сопел – 2)

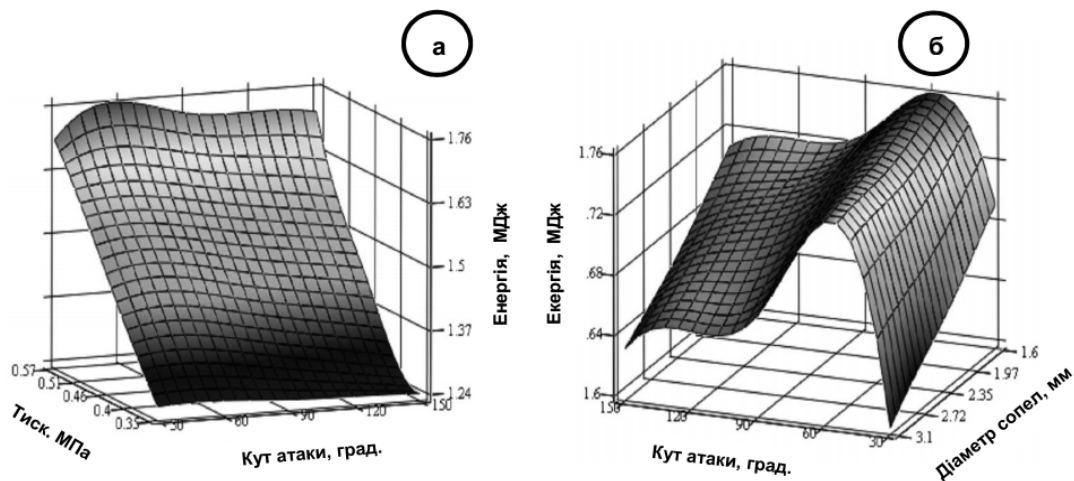


Рис. 2. Залежність теплової енергії від:
 а – тиску на вході у кавітатор та кута атаки струменів ($d=1,6$ мм);
 б – діаметра сопел та кута атаки струменів (кількість сопел – 3)

Таблиця 1

Залежність швидкості рідини в соплах від тиску на вході у кавітатор (діаметр сопел – 1,6 мм)

Швидкість води у соплі, м/с	Тиск на вході у кавітатор, МПа				
		0,35	0,44	0,47	0,53
	10	13	14	16	18

Залежність теплової енергії від діаметра сопел та кута атаки струменів (поверхні на рис. 1, б, 2, б) має екстремальний характер. Максимуму значень енергії досягали: за кута атаки струменів 120 град. і діаметра сопла 1,6 мм – для 2-х сопел; за кута атаки 50 град. і діаметра сопел 1,6 мм – для 3-х сопел. Зазначене можна пояснити на основі аналізу рис. 3 і 4, що ілюструють просторове розташування сопел та взаємодію струменів.

Фігурою перетину двох безперервних у часі струменів рідини є неправильний еліпс (рис. 3, еліпс CRDR). Найінтенсивніше зіткнення струменів відбувається у ближній до сопел частині еліпса – півеліпсі CROR площею S_1 . Фігура, що утворюється в результаті зіткнення трьох струменів рідини, є об'ємною і складається з трьох пелюстків, розташованих під кутом 120° один щодо одного. Кожен із них утворюється під час зіткнення двох суміжних струменів і також є неправильним еліпсом, зміщеним щодо центру симетрії вздовж однієї з півосей (рис. 4). Однак найінтенсивніше зіткнення суміжних струменів відбувається лише у тій частині площини, що розташована найближче до сопел, тобто обмежується площиною NOPD.

Максимум значень теплової енергії за певної просторової конфігурації сопел (120 град. – для 2-х сопел і 50 град. – для 3-х сопел) можна пояснити відношенням площі перерізу вихідного струменя з швидкостями, близькими до максимальної (осьової), до площі зіткнення струменів, що дорівнює площі еліпса. За визначених кутів атаки струменів це відношення є максимальним, що забезпечує максимально можливу за цих умов концентрацію енергії на одиницю площі кавітаційного кластера і, як наслідок, полегшує збудження і розвиток кавітації. Отже, оскільки енергія, що у підсумку виділяється внаслідок зіткнення струменів рідини, залежить від площі такого зіткнення, то процес гідродинамічної струменевої кавітації можна з деяким наближенням розглядати як псевдогетерогенний.

Поверхні, що ілюструють залежність теплової енергії від діаметра сопел та кута атаки струменів (рис. 2, б), апроксимовано поліноміальною функцією вигляду

$$E(b, d) = a_0 + a_1 b + a_2 d, \quad (3)$$

де β – кут атаки струменів, град.; d – діаметр сопел, мм. Числові значення при членах поліному регресії для певної кількості сопел наведено у табл. 2.

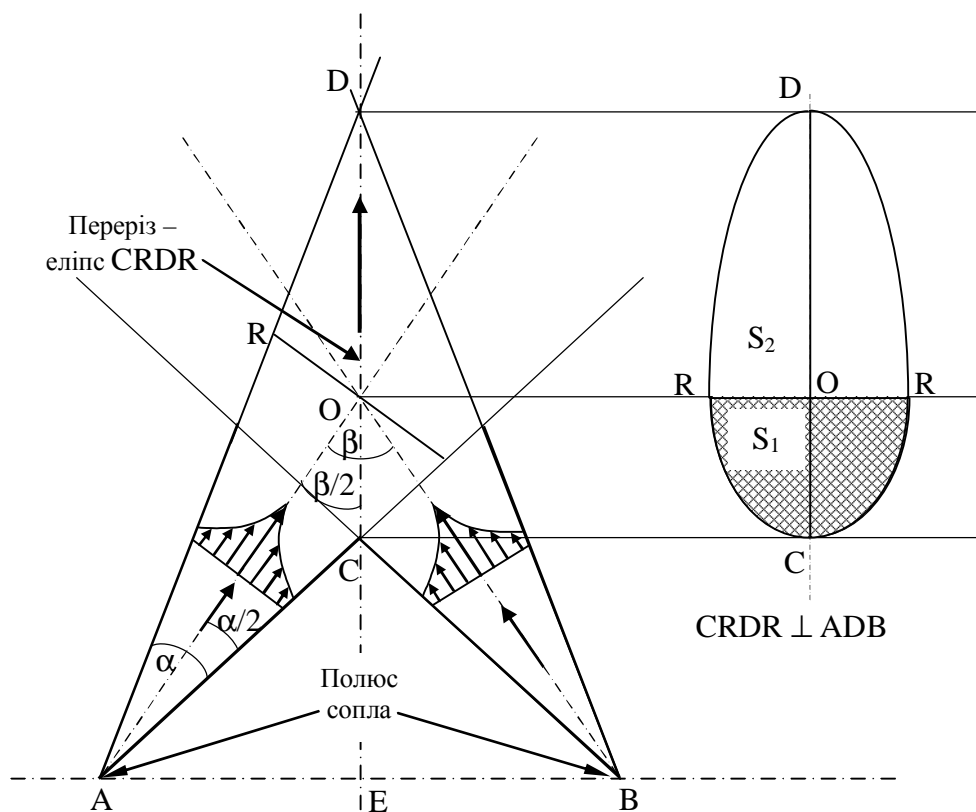


Рис. 3. Схема взаємодії двох струменів рідини (сопла розташовані у площині рисунка): α – кут розкриття струменя; β – кут атаки струменів (кут між осями сопел); AB – віддаль між вершинами конусів (вершина всередині сопла, положення якої можна визначити за діаметром сопла та кутом розкриття струменя); $CRDR$ – неправильний еліпс (переріз площиною місця контакту двох струменів)

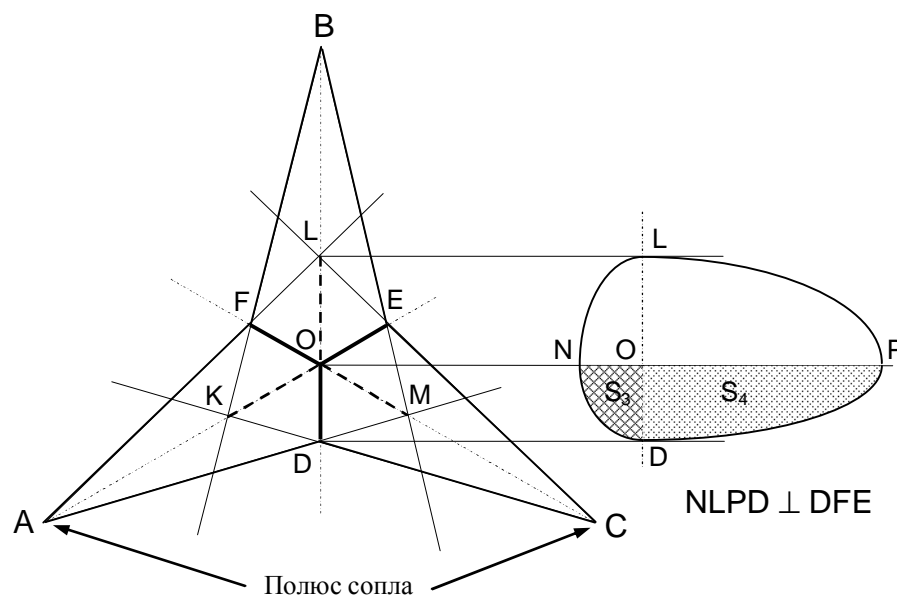


Рис. 4. Схема взаємодії трьох струменів рідини:
 $NLPD$ – площина зіткнення струменів з полюсами A і C

Значення емпіричних коефіцієнтів

Коефіцієнт	Кількість сопел		Розмірність
	2	3	
a_0	1449256,44	1800515,84	Дж
a_1	650,37	-88,12	Дж/град
a_2	-24356,71	-43831,23	Дж/мм

Для оцінювання впливу кожного з факторів (діаметра та кута атаки струменів) на результативну величину теплової енергії провели регресійний аналіз засобами MS Excel із використанням методу найменших квадратів. Значення коефіцієнтів роздільної детермінації: 0,53 (для кута атаки струменів) і 0,11 (для діаметра сопел) у разі використання 2-х сопел; 0,00956 (для кута атаки струменів) і 0,36 (для діаметра сопел) – за використання 3-х сопел. Вищезазначені дані переконливо свідчать, що у випадку використання 2-х сопел найсуттєвішим фактором, який визначає величину теплової енергії, є кут атаки струменів (82,8 %). Для 3-х сопел величина теплової енергії домінують визначається діаметром сопла (97,4 %). Максимальна відносна похибка, що виникає під час розрахунку теплової енергії за формулою (3) (прогнозована теплова енергія), становить: 2,6 % – для 2-х сопел; 3,9 % – для 3-х сопел.

Висновки. На основі енергетичного аналізу роботи гідродинамічного струменевого кавітатора встановлено умови, що забезпечують найефективніше використання підведеної до системи енергії (ККД = 88,9 %): діаметр сопла – 1,6 мм; кількість сопел – 3; кут атаки струменів – близько 50 град.

Отже, використовуючи отриману емпіричну залежність теплової енергії від конструктивних параметрів сопел та їх просторової конфігурації, можна цілеспрямовано регулювати її величину, тобто контролювати генерувати парогазові бульбашки у заданому діапазоні їх дисперсності, що необхідно для подальшого ефективного здійснення флотації.

1. Благодарная Г. И. Анализ методов очистки высококонцентрированных сточных вод предприятий пищевой промышленности / Г. И. Благодарная, А. А. Шевченко, С. В. Лунин // Научн.-техн. сборник “Коммунальное хозяйство городов”. – 2010. – № 93. – С. 176–182. 2. Знак З. О. Розроблення кавітаційно-флотаційного процесу очищення стічних вод в аспекті реалізації сучасних концепцій синтезу хіміко-технологічних систем / З. О. Знак, Ю. В. Сухацький, Р. В. Мних // Вісник Нац. ун-ту “Львівська політехніка”. Хімія, технологія речовин та їх застосування. – 2014. – № 787. – С. 75–79. 3. Анісімов В. В. Гідродинамічні кавітатори для інтенсифікації процесів гомогенізації в рідинних середовищах: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.17.08 “Процеси та обладнання хімічної технології” / Володимир Володимирович Анісімов; ДВНЗ “УДХТУ”. – Дніпропетровськ, 2014. – 20 с. 4. Гідродинамічний кавітаційний тепловий реактор: пат. на корисну модель 74009 Україна: МПК C02F 1/72 / Я. А. Боровий, О. А. Андрєєв, А. В. Малюга, У. В. Моторнюк, В. М. Лесько, І. С. Водько, І. С. Мірошніченко, В. В. Мовчанець, О. В. Мовчанець, Р. О. Запорожець, Р. С. Жовнір. – № 2012 04747; заявл. 17.04.2012; опубл. 10.10.2012, Бюл. № 19. – 3 с. 5. Федоткин И. М. Использование кавитации в технологических процессах / И. М. Федоткин, А. Ф. Немчин. – К.: Вища школа, 1984. – 68 с.