

Знак З. О.

Сухацький Ю. В.

Мних Р. В.

*Національний
університет
“Львівська політехніка”*

Znak Z. O.

Sukhatsky Yu. V.

Mnykh R. V.

*Lviv Polytechnic National
University*

УДК 628.34

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ГІДРОДИНАМІЧНОГО СТРУМЕНЕВОГО КАВІТАТОРА ВІД КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ КАВІТУВАЛЬНОГО ЕЛЕМЕНТА

У статті обґрунтовано необхідність застосування нетрадиційних технологій для очищення стічних вод з високим вмістом органічних речовин. На основі огляду джерел інформації запропоновано для очищення таких вод використовувати методи, в яких енергію до системи підводять у вигляді імпульсних коливань. Розроблено концепцію кавітаційно-флотаційної технології очищення стічних вод, що передбачає кавітаційне генерування бульбашок з їх подальшим використанням на стадії флотації.

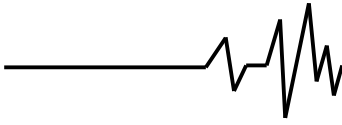
Наведено результати досліджень залежності ефективності роботи гідродинамічного струменевого кавітатора від конструктивних параметрів сопел та їх просторової конфігурації. Встановлено оптимальний режим кавітаційного оброблення води та генерування кавітаційних парогазових бульбашок. Розраховані значення енергії та імпульсу кумулятивного струменя підтверджують високу просторову локалізацію енергії. Розміри кавітаційних бульбашок та їх кількість дають змогу успішно реалізувати другу стадію запропонованої технології – флотаційну.

Ключові слова: стічні води, кавітація, флотація, гідродинамічний кавітатор, струмені, сопла.

Постановка проблеми. Посилення урбанізаційних та глобалізаційних тенденцій у сучасному світі супроводжується різким зростанням обсягів висококонцентрованих стічних вод. Серед них значну загрозу для природних водних екосистем становлять стічні води з високим вмістом органічних речовин, які є типовими відходами діяльності підприємств харчової та переробної галузей. Вміст органічних забруднювачів у стічних водах зазвичай коливається у широкому діапазоні, що вимагає застосування енергоємних, багатостадійних, складних в апаратному та високовартісних у фінансовому планах технологій їх очищення. Тому використання традиційних, зокрема біологічних, методів очищення висококонцентрованих за органічними речовинами стічних вод часто стає неможливим. Отже, актуальним завданням є пошук нових, нетрадиційних методів очищення таких стічних вод.

Сучасні перспективні методи інтенсифікації різноманітних технологічних процесів, у тому числі й очищення стічних вод, полягають у застосуванні концентрованих енергетичних впливів, що зумовлюють виникнення комплексу фізичних та хімічних ефектів. Найефективнішим є підведення до системи зовнішньої нетеплової енергії у вигляді акустичних чи імпульсних коливань. Вони забезпечують значну локалізацію енергії у короткотривалих часовій і просторовій областях, що супроводжується різноманітними фізико-хімічними ефектами. Особливе місце серед таких ефектів належить феномену «кавітації».

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Розрізняють два основних способи створення кавітації: акустичний і гідродинамічний. Область застосування першого обмежена лабораторними дослідженнями, оскільки цей метод



(використання акустичних коливань ультразвукового діапазону) потребує значних питомих енерговитрат та зумовлює ерозію робочих елементів, наприклад, магнітострикторів, а також лімітується потужністю існуючого обладнання. Перевагами гідродинамічної кавітації (зниження тиску в потоці до значень, що близькі до значень тиску насиченої водяної пари за відповідних умов), порівняно із акустичною, є рівномірність просторового оброблення рідиннофазового середовища та висока продуктивність.

Інтенсифікувальна дія гідродинамічної кавітації зумовлена виникненням низки ефектів [1], а саме: пульсацій тиску (10^2 - 10^3 МПа) і хвиль розрідження-стиснення під час пульсації парогазових кавітаційних бульбашок; кумулятивних мікроструминок високого енергетичного потенціалу, які руйнують межі розділу фаз, з утворенням емульсії чи суспензії; фазових переходів на поверхні бульбашок; пульсацій температури (понад 10^3 К) внаслідок колапсу кавітаційних бульбашок, що, своєю чергою, пришвидшує дифузійні процеси та хімічну взаємодію. Такі явища стали передумовою для цілеспрямованого використання кавітаційного впливу в різноманітних технологічних процесах – масообмінних, хімічних, біологічних тощо. Так, застосування кавітаційних полів для активації малорозчинних неорганічних реагентів, зокрема, кальцію гідроксиду в технологіях очищення стічних вод, крім вищезазначених ефектів, спричиняє й такі: диспергування частинок $\text{Ca}(\text{OH})_2$, що збільшує їх седиментаційну стійкість, а відтак і час їх перебування в зоні реакції, а також виникнення на поверхні частинок ювенільних реакційноактивних ділянок, що призводить до зростання седиментаційної стійкості його частинок і, відповідно, до збільшення часу їх перебування в зоні реакції. Окрім того, оброблення суспензії $\text{Ca}(\text{OH})_2$ у кавітаційних полях спричиняє утворення колоїдних частинок, що дає змогу використовувати їх як коагулянти у технологіях очищення стічних вод [2].

Під час очищення стічних вод, забруднених, переважно, солями жирних кислот (ЖК), за допомогою гідродинамічно активованого кальцію гідроксиду спостерігали супутній ефект – флоатацію продуктів взаємодії $\text{Ca}(\text{OH})_2$ із солями ЖК на поверхню рідини у

виділі стійкої піни. Це стало підставою для розроблення концепції кавітаційно-флоатаційної технології очищення стічних вод від органічних сполук. Суть зазначеної технології полягає у використанні бульбашок газу, що утворюються внаслідок перебігу кавітації, для флоатації дисперсних домішок у воді [3].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Незважаючи на чималу кількість конструкцій гідродинамічних кавітаторів чи окремих їх елементів [4], ефективність їх роботи, передусім у процесах очищення стічних вод, у наявних джерелах інформації висвітлена недостатньо. Тому актуальним є дослідження роботи гідродинамічних струменевих кавітаторів залежно від конструктивних параметрів кавітувальних елементів, зокрема, в аспекті забезпечення ефективності використання енергії у технологіях очищення стічних вод.

Мета дослідження: встановлення залежності ефективності роботи гідродинамічного струменевого кавітатора від конструктивних параметрів кавітувальних елементів (профільовані сопла): їх числа, просторового розташування та еквівалентного діаметру сопел.

Основні результати дослідження. Дослідження виконували на лабораторній установці [3], основним елементом якої був гідродинамічний кавітатор струменевого типу. Він складався з кварцового корпусу (внутрішній діаметр – 44 мм), вузлів герметизації та змінного кавітувального елемента – системи профільованих сопел із внутрішнім діаметром 1,6; 2,2 або 3,1 мм. Кут атаки струменів (кут між осями сопел) змінювали в діапазоні $30 \dots 150^\circ$. Перевагами таких кавітаторів є формування суцільної області кавітації, яка виникає на деякій відстані від сопел, що унеможлиблює їх ерозію. Тиск на вході у кавітатор (у межах $0,35 \dots 0,57$ МПа) регулювали байпасом. Впродовж досліджень вимірювали температуру води на виході з кавітатора та у циркуляційній ємності, а також її витрату в циркуляційному контурі.

Ефективність дії кавітатора за різних параметрів кавітувальних елементів оцінювали за значенням енергетичного (теплового) коефіцієнта корисної дії (ККД) та інтенсивністю генерування бульбашок. Величину ККД визначали за рівнянням

$$ККД = \frac{W_B}{W_H} \cdot 100 \% = \frac{mc\Delta T}{W_H \cdot \tau} \cdot 100 \% = \frac{mc\Delta T}{W_H \cdot \tau} \cdot 100 \%, \quad (1)$$



де W_B – теплова потужність, Вт; W_H – потужність насоса, Вт; m – маса води у контурі, кг; c – теплоємність води, Дж/(кг·К); ΔT – різниця температур води, К; τ – тривалість кавітаційного оброблення води, с.

Радіус бульбашки, що утворюється внаслідок кавітації, є важливою характеристикою на стадії флотації, оскільки він повинен бути сумірний із розміром частинок забруднювача. Зменшення розмірів кавітаційних бульбашок та збільшення їх кількості підвищують ефективність процесу флотації. Для розрахунку розмірів кавітаційних бульбашок та їх кількості використовували відомі залежності [5, 6]. Критичний радіус зародка кавітації (м) визначали за формулою (2)

$$R_{KP} = \frac{2\sigma}{P_{НАС} - P_{ГДР}}, \quad (2)$$

де σ – поверхневий натяг води, Н/м; $P_{НАС}$ – тиск насиченої водяної пари [7], Па; $P_{ГДР}$ – гідростатичний тиск стовпчика рідини у кавітаторі, Па.

Критичний радіус зародка кавітації відповідатиме початковому радіусу кавітаційної бульбашки:

$$m_K = \rho \cdot V_K = \rho \cdot l_K \cdot \frac{\pi \cdot d_K^2}{4} = 0,116 \cdot \rho \cdot R_{МАХ} \cdot \frac{\pi \cdot (0,092 \cdot R_{МАХ})^2}{4}, \quad (9)$$

де ρ – густина води, кг/м³; V_K , l_K , d_K – об'єм, довжина та діаметр кумулятивних мікроструминок, що утворюються внаслідок сплескування кавітаційних бульбашок, відповідно.

Кількість кавітаційних бульбашок розраховували за відношенням сумарної теплової енергії, що виділилась внаслідок перебігу кавітації, до енергії однієї мікроструминки:

$$n = \frac{E}{E_K} = \frac{cm\Delta T}{E_K}, \quad (10)$$

де E – сумарна теплова енергія, Дж.

Для визначення енергетичних параметрів кумулятивного струменя – кінетичної енергії кумулятивного струменя та його імпульсу – використовували залежності (11-17). Тиск виникнення парової кавітації ($P_{КАВ.П}$, Па) розраховували за формулою (11). Парова кавітація зв'язана з різким ростом і сплескуванням кавітаційних бульбашок.

$$P_{КАВ.П} = P_{НАС} - \frac{2}{3\sqrt{3}} \sqrt{\frac{2\sigma / R_0}{P_0 - P_{НАС} + \frac{2\sigma}{R_0}}}, \quad (11)$$

$$R_{KP} = R_0. \quad (3)$$

Максимальний радіус кавітаційної бульбашки в момент сплескування:

$$R_{МАХ} = 4,5 \cdot R_0. \quad (4)$$

Швидкість сплескування кавітаційної бульбашки (м/с):

$$v_C = \sqrt{\frac{2}{3} \cdot ((R_{МАХ} / R_0)^3 - 1) \cdot \frac{P_B}{(\partial\rho / \partial t)_{V=const}}}, \quad (5)$$

де P_B – тиск, що діє на бульбашку, Па.

$$P_B = P_{АТМ} + P_{ГДР} + P_{ГДР.КОМ}, \quad (6)$$

де $P_{АТМ}$ – атмосферний тиск, Па ($P_{АТМ} = 101\,325$ Па); $P_{ГДР.КОМ}$ – гідро-статичний тиск стовпа води в комунікаціях установки, Па.

Швидкість кумулятивної мікроструминки:

$$v_K = k \cdot v_C, \quad (7)$$

де k – коефіцієнт кумуляції, $k = 4$ [8].

Енергія кумулятивної мікроструминки (Дж) дорівнює

$$E_K = \frac{m_K \cdot v_K^2}{2}, \quad (8)$$

де m_K – маса кумулятивного мікроструменя, кг.

де P_0 – тиск на вході у кавітатор, Па ($P_0 = 0,35 \dots 0,57$ МПа).

Перепад тиску в соплах і на виході з них (Па):

$$\Delta P = P_0 - P_{КАВ.П}. \quad (12)$$

Швидкість струменів води на виході з сопел (м/с):

$$w_{ВИХ.С} = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}}. \quad (13)$$

Швидкість кумулятивного струменя з врахуванням конфігурації сопел:

$$w_{КУМ.СТР} = n_{СТР} \cdot w_{ВИХ.С} \cdot \cos(\alpha/2), \quad (14)$$

де $n_{СТР}$ – кількість струменів, зіткнення яких спричиняє утворення кумулятивного струменя (кількість струменів дорівнює числу сопел); α – кут атаки струменів (кут між осями сопел), град.

Масу кумулятивного струменя визначали аналогічно до маси кумулятивної мікроструминки з врахуванням кількості струменів, що утворюють кумулятивний, їх швидкості та швидкості кумулятивного струменя. Приростом маси струменя від моменту виходу з сопла до зіткнення з іншим струменем знехтуємо, оскільки відстань між



виходом з сопла і точкою стикання струменів набагато менша, ніж довжина сопел (l , м).

Маса кумулятивного струменя (кг) та його енергія (Дж) дорівнюють:

$$m_{\text{КУМ.СТР}} = \frac{n_{\text{СТР}} \cdot \rho \pi r^2 l \cdot w_{\text{ВИХ.С}}}{w_{\text{КУМ.СТР}}}, \quad (15)$$

$$E_{\text{КУМ.СТР}} = \frac{m_{\text{КУМ.СТР}} \cdot w_{\text{КУМ.СТР}}^2}{2} = n_{\text{СТР}}^2 \pi r^2 l \Delta P \cos(\alpha/2). \quad (16)$$

Імпульс кумулятивного струменя (Н·с):

$$P_{\text{КУМ.СТР}} = m_{\text{КУМ.СТР}} \cdot w_{\text{КУМ.СТР}} = n_{\text{СТР}} \pi r^2 l \sqrt{2 \Delta P \rho}. \quad (17)$$

Кінетична енергія (Дж) та імпульс (Н·с) струменя на виході з сопла:

$$E_{\text{СТР}} = \frac{m_{\text{СТР}} \cdot w_{\text{ВИХ.С}}^2}{2} = \pi r^2 l \Delta P, \quad (18)$$

$$P_{\text{СТР}} = m_{\text{СТР}} \cdot w_{\text{ВИХ.С}} = \pi r^2 l \sqrt{2 \Delta P \rho}. \quad (19)$$

На підставі досліджень, проведених за наведених вище умов, визначили залежність енергетичного ККД гідродинамічного кавітатора від тиску на вході у кавітувальний елемент та діаметра одиничного сопла.

Ефективність кумуляції оцінювали за такими показниками як коефіцієнт кумуляції кінетичної енергії ($k_{\text{КУМ.К.Е}}$) та коефіцієнт зростання імпульсу ($k_{\text{ЗР.ІМП}}$).

Коефіцієнти кумуляції кінетичної енергії та зростання імпульсу дорівнюють відповідно:

$$k_{\text{КУМ.К.Е}} = \frac{E_{\text{КУМ.СТР}}}{n_{\text{СТР}} \cdot E_{\text{СТР}}}, \quad (20)$$

$$k_{\text{ЗР.ІМП}} = \frac{P_{\text{КУМ.СТР}}}{n \cdot P_{\text{СТР}}}. \quad (21)$$

Збільшення як тиску на вході у кавітатор (P_0), так і числа сопел забезпечують зростання ККД. Так, у разі використання 2-х сопел максимальний енергетичний ККД становив 77 % за $P_0 = 0,57$ МПа (57,9 % за $P_0 = 0,35$ МПа). З підвищенням тиску від 0,35 до 0,57 МПа ККД кавітатора з 3-ма соплами зростає практично прямопропорційно: від 63,5 до 88,9 % – для сопел із внутрішнім діаметром 1,6 мм; від 62,2 до 87,9 % – для 2,2 мм і від 60,3 до 87,3 % – для 3,1 мм.

З врахуванням втрат, визначених під час холостих досліджень, максимальний енергетичний ККД кавітатора становив 90,6 %.

Встановлено, що залежність енергетичного ККД від просторового розташування сопел (кута атаки струменів) має екстремальний характер (рис. 1).

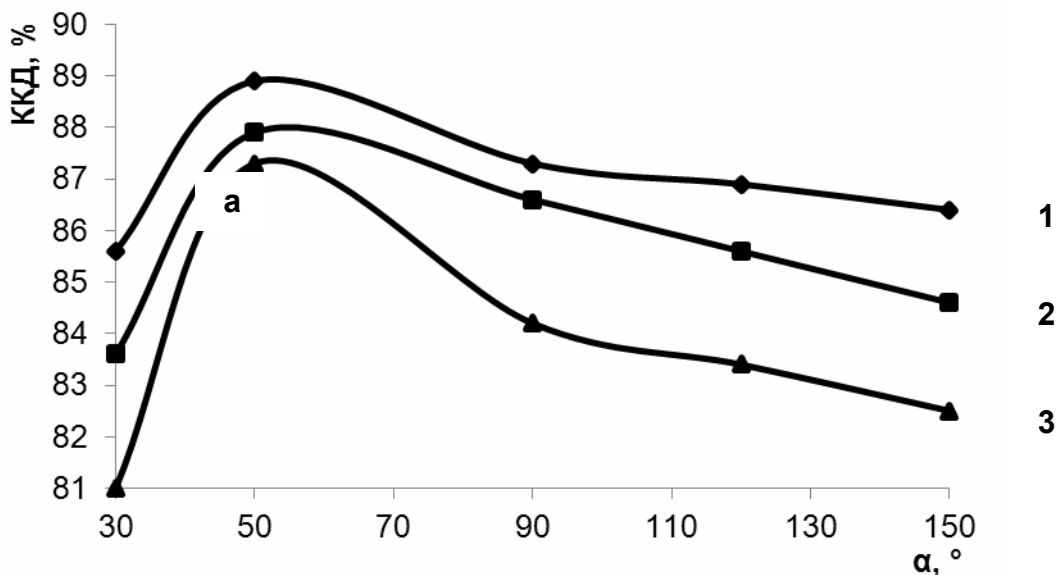
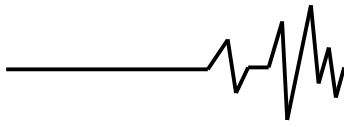


Рис. 1. Залежність енергетичного коефіцієнта корисної дії (ККД, %) від кута атаки струменів (α , °): діаметр сопла, мм: 1 – 1,6; 2 – 2,2; 3 – 3,1 (тиск на вході у кавітатор – 0,57 МПа; тривалість процесу – 30 хв.; кількість сопел – 3)



Максимум значень енергетичного ККД спостерігали в околі 50 град. У точках локального екстремуму (88,9; 87,9; 87,3 % для сопел із внутрішнім діаметром 1,6; 2,2; 3,1 мм відповідно) система є найбільш гомогенізованою. Це підтверджується виглядом кавітаційного кластера (рис.2) за різних кутів атаки струменів (наприклад, 30 і 50 град.). Так, зі зміною кута від 50 до 30 градусів однорідність кавітаційного кластера зменшується, а розміри бульбашок, що його утворюють, зростають. У випадку зростання кута атаки струменів від 50 до 150 град. однорідність кавітаційного поля зменшується і стає подібною, як і за кута 30

град. Отже, найрівномірніше силове оброблення водного середовища реалізується за кута атаки струменів близько 50 град.

Інтенсивність зменшення енергетичного ККД зі зміною кута атаки струменів від 50 до 150 град. є меншою, ніж у разі його зменшення від 50 до 30 град. (2,5 проти 3,3 % для сопел із внутрішнім діаметром 1,6 мм; 3,3 проти 4,3 % – 2,2 мм; 4,8 проти 6,3 % – 3,1 мм). Тому показовішим буде аналіз кавітаційного процесу з точки зору енергетичних параметрів струменів (вихідних та кумулятивного) саме у діапазоні зміни кута атаки від 50 до 150 °.

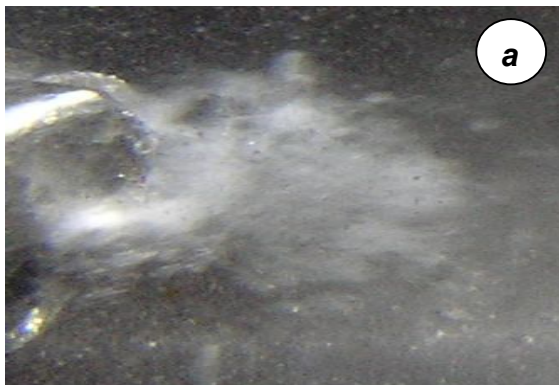


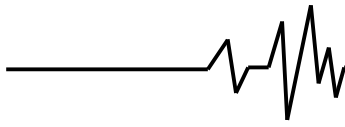
Рис. 2. Вигляд кавітаційного кластера залежно від кута атаки струменів, град.:
а – 30; б – 50

Аналіз даних, наведених на рис. 1, дає змогу вибрати раціональну конструкцію кавітаційного елемента, який забезпечує найбільше енерговнесення у водну систему, яку обробляють. Отже, для реалізації такого процесу доцільно використовувати 3 сопла із внутрішнім діаметром кожного 1,6 мм, кут між осями яких становить 50 °, за тиску на вході у кавітатор 0,57 МПа. Зменшення діаметра сопла призводить до різкого збільшення опору сопел і, відповідно, зменшення продуктивності кавітаційного оброблення.

Значення енергетичних параметрів кумулятивного струменя та струменів, що його формують, за різних значень кута атаки наведені у таблиці 1 (кількість сопел – 3; внутрішній діаметр сопел – 1,6 мм; тиск на вході у кавітатор – 0,57 МПа). Як видно з табл. 1, зі збільшенням кута атаки кінетична енергія кумулятивного струменя зменшується, а імпульс залишається незмінним. Це можна пояснити одночасним зростанням маси кумулятивного струменя і зменшенням його

швидкості. У разі збільшення кута атаки від 50 до 150 ° ці величини змінюються пропорційно (у 3,5 рази) – як наслідок, імпульс кумулятивного струменя є сталим. Оскільки кінетична енергія кумулятивного струменя пропорційна його масі в першій степені, а швидкості – у квадраті, то зростання його маси не компенсує зменшення його швидкості. Це призводить до зменшення кінетичної енергії кумулятивного струменя. Кінетична енергія та імпульс вихідних струменів зі збільшенням кута їх атаки не змінюються, тому що сталими залишаються їх маса та швидкість. Отже, зменшення коефіцієнта кумуляції кінетичної енергії та сталість коефіцієнта зростання імпульсу зі збільшенням кута атаки струменів є цілком закономірними.

Анігіляція (колапс) кавітаційних бульбашок спричиняє утворення кумулятивних мікроструминок, швидкість яких може досягати 500 м/с [10, 11]. Характер зміни розмірів та кількості кавітаційних бульбашок залежно від величини енерговнесення у систему, наведений у таблиці 2.



Таблиця 1

Характеристика енергетичних параметрів кумулятивного струменя та струменів, що його утворюють, за різних кутів атаки

Кут атаки, град.	Кінетична енергія, Дж		Коефіцієнт кумуляції кінетичної енергії	Імпульс, Н·с		Коеф. зростання імпульсу
	сумарна вихідних струменів	кумулятивного струменя		сумарний вихідних струменів	кумулятивного струменя	
α	$\Sigma E_{СТР} \cdot 10^3$	$E_{КУМ.СТР} \cdot 10^3$	$k_{КУМ.К.Е}$	$\Sigma p_{СТР} \cdot 10^4$	$p_{КУМ.СТР} \cdot 10^4$	$k_{ЗР.ІМП}$
50	176,17	478,99	2,72	104,66	607,16	5,8
90	176,25	373,88	2,12	104,70	607,37	5,8
120	176,29	264,44	1,50	104,72	607,48	5,8
150	176,29	136,88	0,78	104,72	607,55	5,8

Зі збільшенням кута атаки струменів зростають початковий та максимальний радіуси кавітаційної бульбашки, маса та енергія кумулятивної мікроструминки; зменшуються сумарна теплова енергія та кількість

кавітаційних бульбашок (табл. 2). Однак з цих даних не зрозуміло, чому зі збільшенням кута атаки струменів приріст енергії кумулятивної мікроструминки перевищує темп спадання сумарної теплової енергії.

Таблиця 2

Енергетичні аспекти генерування кавітаційних бульбашок (кількість сопел – 3; внутрішній діаметр сопел – 1,6 мм; $P_0 = 0,57$ МПа)

Кут атаки струменів, град.	Радіус кавітаційної бульбашки, мкм		Характеристика кумулятивного мікроструменя			Сумарна теплова енергія, Дж	Кількість кавітаційних бульбашок
	початковий	максимальний	маса, кг	швидкість, м/с	енергія, Дж		
α	R_0	R_{MAX}	$m_K \cdot 10^{-3}$	u_K	$E_K \cdot 10^9$	$\Sigma E_T \cdot 10^6$	$n \cdot 10^{-13}$
50	13,4	60,5	1,68	326,00	8,93	1,760	18,7
90	13,8	62,1	1,83	325,97	9,72	1,729	17
120	14	63	1,91	325,95	10,1	1,721	16
150	14	63	1,91	325,95	10,1	1,711	15,2

Пояснити це явище можна за допомогою модифікованої теорії гомогенної нуклеації. Її суть полягає у тому, що утворення та ріст зародків кавітації за нижчих температур відбуваються інтенсивніше, ніж за вищих. Це зв'язано з переважаючою роллю гетерогенної нуклеації [12]. У випадку, якщо центри гетерогенного зародкоутворення мають малі розміри, визначають швидкість концентрування

критичних зародків. Для цього у вираз для її розрахунку вводять фактор гетерогенності G ($G \in (0, 1]$), який характеризує зменшення роботи W_{NUCL} під час нуклеації на ядрах, що існують у рідині.

Для фактора гетерогенності (G) використовують таку кореляцію:

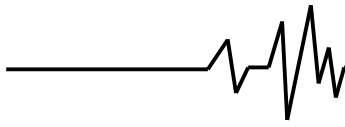
$$G = (1 + 1,4 \cdot 10^{-10} \cdot ((4(P_0 - P_{КАВ.П})V) / (\ln_C \pi d_C^2))^{0,8} \cdot (T_0 / T_{КР})^{28,46}), \quad (22)$$

де V – витрата води, м³/с; n_C – кількість сопел; d_C – діаметр сопла, м; T_0 – початкова температура води, К; $T_{КР}$ – критична температура води ($T_{КР} = 647$ К), К.

Робота утворення зародка кавітації критичного радіуса (Дж):

$$W_{NUCL} = \frac{16\pi\sigma^3}{3(P_{НАС} - P_{ГЦДР})}. \quad (23)$$

Швидкість концентрування зародків критичного радіуса (H , кг/(м³·с²)):



$$H = \rho \cdot (N_A / M(H_2O))^{3/2} \cdot \sqrt{\frac{2\sigma}{\pi}} \cdot \exp\left\{-\frac{G \cdot W_{NUCL}}{k_B \cdot T}\right\}, \quad (24)$$

де N_A – стала Авогадро, $N_A = 6,022 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹; $M(H_2O) = 18 \cdot 10^{-3}$ кг/моль; k_B – стала Больцмана, $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К; T – температура води, К.

Результати розрахунків величин, що характеризують процеси зародкоутворення відповідно до модифікованої теорії гомогенної нуклеації, наведені у таблиці 3.

Таблиця 3

Розрахункові величини, що характеризують процеси зародкоутворення (кількість сопел – 3; внутрішній діаметр сопел – 1,6 мм; $P_0 = 0,57$ МПа)

Кут атаки струменів, град.	Фактор гетерогенності	Робота утворення зародка кавітації критичного радіуса, Дж	Гетерогенна робота, Дж	Швидкість концентрування зародків критичного радіуса, кг/(м ³ ·с ²)
α	$G \cdot 10^{28}$	$W_{NUCL} \cdot 10^{10}$	$G \cdot W_{NUCL} \cdot 10^{38}$	$H \cdot 10^{40}$
50	231,34	0,517	119,60	3,99
90	170,63	0,547	93,33	4,00
120	146,36	0,562	82,25	4,00
150	146,36	0,562	82,25	4,00

Як видно, зі збільшенням кута атаки струменів зменшуються фактор гетерогенності та робота утворення зародка критичного радіуса. Це призводить до зростання швидкості концентрування зародків критичного радіуса. Отже, зростання швидкості концентрування зародків критичного радіуса зі збільшенням кута атаки струменів пояснює незначні темпи спадання сумарної теплової енергії. Збільшення кута між осями сопел призводить до того, що ступінь гетерогенності системи зростає, тобто зменшується ефект гомогенізації, зумовлений кавітацією [13].

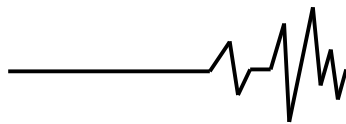
Висновки. Зі зростанням тиску на вході у кавітатор та зменшенням діаметра сопел і кута атаки струменів енергетичний коефіцієнт корисної дії гідродинамічного струменевого кавітатора підвищується. Встановлена залежність енергетичних показників роботи гідродинамічного кавітатора від конструктивних параметрів кавітувального елемента дала змогу вибрати раціональний режим здійснення процесу кавітації: кількість сопел – 3; внутрішній діаметр сопла – 1,6 мм; кут атаки струменів – 50 °; тиск на вході у кавітатор – 0,57 МПа.

Велика кількість кавітаційних бульбашок та їх висока дисперсність (початковий радіус – 13 мкм) створює сприятливі умови для реалізації другої стадії кавітаційно-флотаційної технології очищення стічних вод з високим вмістом органічних сполук, а саме – флотації частинок забруднювачів. Змінюючи умови здійснення кавітації можна цілеспрямовано

регулювати дисперсність бульбашок газу, що забезпечить найефективнішу флотацію речовин-забруднювачів.

Список використаних джерел

1. Шевчук Л.І. Вібраційний електромагнітний кавітатор резонансної дії / Л.І. Шевчук, І.С. Афтаназів, О.І. Строган // Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні. – 2011. – Вип. 45. – с. 374–379.
2. Мних Р.В. Кавітаційна активація малорозчинних неорганічних реагентів у технологіях очищення стічних вод (на прикладі кальцію гідроксиду): автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.17.21 “Технологія водоочищення” / Роман Володимирович Мних; НТУУ “КПІ”. – К., 2014. – 20 с.
3. 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 НУ “Львівська політехніка”. Хімія, технологія речовин та їх застосування. – 2014. – № 787. – с. 75–79.
4. Федоткин И.М. Использование кавитации в технологических процессах / И.М. Федоткин, А.Ф. Немчин. – К.: Вища школа, 1984. – 68 с.
5. Иванов О.С. О кавитационном измельчении твердых дисперсных материалов



/ О.С. Иванов, М.С. Василишин // Ползуновский вестник. – 2010. – № 4-1. – с. 206–209.

6. Промтов М.А. Пульсационные аппараты роторного типа: теория и практика / М.А. Промтов. – М.: Машиностроение-1, 2001. – 260 с.

7. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. Учебное пособие для вузов / К.Ф. Павлов, П.Г. Романков, А.А. Носков; под ред. чл.-корр. АН СССР П.Г. Романкова. – 10-е изд., перераб. и доп. – Л.: Химия, 1987. – 576 с.

8. Майер В.В. Кумулятивный эффект в простых опытах / В.В. Майер. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989. – 192 с.

9. Сілін Р.І. Науково-технічні основи розроблення вібромашин для впливу на властивості води / Р.І. Сілін, А.І. Гордєєв // Вібрації в техніці та технологіях. – 2009. – № 4 (56). – с. 141–148.

10. Иваницкий Г.К. Численное моделирование поведения пузырькового кластера в процессах гидродинамической кавитации / Г.К. Иваницкий // Современная наука: сборник научных статей. – 2011. – № 2 (7). – с. 52–58.

11. Вітенько Т.М. Гідродинамічна кавітація у масообмінних, хімічних і біологічних процесах: монографія / Т.М. Вітенько. – Тернопіль: видавництво ТДТУ ім. Івана Пулюя, 2009. – 224 с.

12. Кумзерова Е.Ю. Численное моделирование образования и роста паровой фазы в задачах быстрого падения давления жидкости / Е.Ю. Кумзерова, А.А. Шмидт // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2004. – № 2. – с. 123–131.

13. Долінський А.А. Використання механізмів і методів ДІВЕ для керування кінетикою перебігу нанорівневих процесів / А.А. Долінський, А.О. Авраменко, Г.К. Іваницький // Вісник НАН України. – 2013. – № 8. – с. 47–57.

Список джерел в транслітерації

1. Shevchuk L.I. Vibratsiynyy elektromagnitnyy kavitator rezonansnoyi diyi / L.I. Shevchuk, I.S. Aftanaziv, O.I. Strohan // Avtomatyzatsiya vyrobnychykh protsesiv u mashynobuduvanni ta prykladobuduvanni. – 2011. – Vyp. 45. – s. 374–379.

2. Mnykh R.V. Kavitatsiyna aktyvatsiya malorozchynnykh neorganichnykh reagentiv u tekhnologiyakh ochyshchennya stichnykh vod (na prykladi kaltsiyu gidroksydu): avtoref. dys. na zdobuttya nauk. stupenya kand. tekhn. nauk: spets. 05.17.21 “Tekhnologiya

vodoochyshchennya” / Roman Volodymyrovych Mnykh; NTUU “KPI”. – K., 2014. – 20 s.

3. Znak Z.O. Rozroblennya kavitatsiyno-flotatsiynogo protsesu ochyshchennya stichnykh vod v aspekti realizatsiyi suchasnykh kontseptsiy syntezu khimiko-tekhnologichnykh system / Z.O. Znak, Yu.V. Sukhatsky, R.V. Mnykh // Visnyk NU “Lvivska politehnika”. Khimiya, tekhnologiya rechovyn ta yikh zastosuvannya. – 2014. – № 787. – s. 75–79.

4. Fedotkin I.M. Ispolzovaniye kavitatsiyi v tekhnologicheskikh protsessakh / I.M. Fedotkin, A.F. Nemchin. – K.: Vyshcha shkola, 1984. – 68 s.

5. Ivanov O.S. O kavitatsionnom izmelcheniyi tverdykh dispersnykh materialov / O.S. Ivanov, M.S. Vasilishin // Polzunovskiy vestnik. – 2010. – № 4-1. – s. 206–209.

6. Promtov M.A. Pulsatsiynnyye apparaty rotornogo tipa: teoriya i praktika / M.A. Promtov. – M.: Mashinostroyeniye-1, 2001. – 260 s.

7. Primery i zadachi po kursu protsessov i apparatov khimicheskoy tekhnologiyi. Uchebnoye posobiye dlya vuzov / K.F. Pavlov, P.G. Romankov, A.A. Noskov; pod red. chl.-korr. AN SSSR P.G. Romankova. – 10-e izd., pererab. i dop. – L.: Khimiya, 1987. – 576 s.

8. Mayer V.V. Kumulyativnyy effekt v prostykh opytakh / V.V. Mayer. – M.: Nauka. Gl. red. fiz.-mat. lit., 1989. – 192 s.

9. Silin R.I. Naukovo-tekhnichni osnovy rozroblennya vibromashyn dlya vplyvu na vlastyvoli vody / R.I. Silin, A.I. Gordyeyev // Vibratsiyni v tekhnitsi ta tekhnologiyakh. – 2009. – № 4 (56). – s. 141–148.

10. Ivanitskiy G.K. Chislennoye modelirovaniye povedeniya puzyrkovogo klastera v protsessakh gidrodinamicheskoy kavitatsiyi / G.K. Ivanitskiy // Sovremennaya nauka: sbornik nauchnykh statey. – 2011. – № 2 (7). – s. 52–58.

11. Vitenko T.M. Gidrodynamichna kavitatsiya u masoobminnykh, khimichnykh i biologichnykh protsesakh: monografiya / T.M. Vitenko. – Ternopil: vydavnytstvo TDTU im. Ivana Pulyuya, 2009. – 224 s.

12. Kumzerova E.Yu. Chislennoye modelirovaniye obrazovaniya i rosta parovoy fazy v zadachakh bystrogo padeniya davleniya zhidkosti / E.Yu. Kumzerova, A.A. Shmidt // Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU. – 2004. – № 2. – s. 123–131.

13. Dolinsky A.A. Vykorystannya mekhanizmiv i metodiv DIVE dlya keruvannya kinyetikoju perebigu nanorivnevnykh protsesiv / A.A. Dolinsky, A.O. Avramenko, G.K. Ivanytsky // Visnyk NAN Ukrayiny. – 2013. – № 8. – s. 47–57.



**ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ
ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ
ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО СТРУЙНОГО
КАВИТАТОРА ОТ КОНСТРУКТИВНЫХ
ПАРАМЕТРОВ КАВИТИРУЮЩЕГО
ЭЛЕМЕНТА**

Аннотация. В статье обоснована необходимость применения нетрадиционных технологий для очистки сточных вод с высоким содержанием органических веществ. На основе обзора источников информации предложено для очистки таких вод использовать методы, в которых энергию к системе подводят в виде импульсных колебаний. Разработана концепция кавитационно-флотационной технологии очистки сточных вод, которая предусматривает кавитационное генерирование пузырьков с их последующим использованием на стадии флотации.

Приведены результаты исследований зависимости эффективности работы гидродинамического струйного кавитатора от конструктивных параметров сопел и их пространственной конфигурации. Установлен оптимальный режим кавитационной обработки воды и генерирования кавитационных парогазовых пузырьков. Рассчитанные значения энергии и импульса кумулятивной струи подтверждают высокую пространственную локализацию энергии. Размеры кавитационных пузырьков и их количество позволяют успешно реализовать вторую

стадию предложенной технологии – флотационную.

Ключевые слова: сточные воды, кавитация, флотация, гидро-динамический кавитатор, струи, сопла.

**STUDY OF THE RELATIONSHIP OF THE
EFFECTIVENESS HYDRODYNAMIC JET
CAVITATOR FROM STRUCTURAL
PARAMETERS OF THE CAVITATION DETAIL**

Annotation. In the article were substantiated the necessity of using non-traditional technologies for wastewater with high organic content. Based on the review of information sources suggested for cleaning such water use methods in which energy is supplied to the system in the form of pulse waves. The concept of cavitation and flotation wastewater treatment technology, which provides for the generation of cavitation bubbles and their subsequent use in the flotation stage, was developed.

In the article were presented the results of studies of the efficiency of work hydrodynamic jet cavitator of nozzle design parameters and their spatial configuration. The optimum mode of cavitation treatment of water and generation of steam cavitation bubbles was established. The calculated values of the energy and momentum of the cumulative jet confirm the high spatial localization of energy. The dimensions of the cavitation bubbles and their number can successfully realize the second step of the proposed technology – flotation.

Key words: wastewater, cavitation, flotation, hydrodynamic cavitator, jet, nozzle.