

УДК 628.34+54-41

ЕНЕРГЕТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБРОБЛЕННЯ АГРЕСИВНИХ ВОДНИХ СЕРЕДОВИЩ У ГІДРОДИНАМІЧНИХ КАВІТАТОРАХ

В. Т. ЯВОРСЬКИЙ, З. О. ЗНАК, Ю. В. СУХАЦЬКИЙ, Р. В. МНИХ

Національний університет "Львівська політехніка"

Проаналізовано області застосування ультразвукових та гідродинамічних генераторів кавітаційних полів, зокрема для фізико-механічних процесів. Ефективність розвитку кавітаційних явищ за різних конструктивних параметрів струменевого кавітатора оцінено двома методами – калориметричним та сонохімічного аналізу. Встановлено конструктивні особливості кавітатора (кількість та діаметр сопел, кут між ними тощо), за яких забезпечується максимальне перетворення кінетичної енергії струменів водного середовища у теплову, яка виражає сумарний енергетичний ефект перебігу фізико-механічних і фізико-хімічних процесів та явищ у кавітаційному полі.

Ключові слова: кавітаційні поля, гідродинамічний струменевий кавітатор, теплова енергія, акустичний сигнал, сонохімічний аналіз.

Розвиток багатьох галузей промисловості (хімічної, металургії, машинобудування, харчової тощо) потребує інтенсифікації різноманітних технологічних процесів – від диспергування і перемішування до очищення та знезараження [1]. Дія будь-яких інтенсифікувальних чинників зводиться до передачі реакційній системі енергії, як правило, у формі імпульсів [2], зокрема через кавітацію. Кавітаційні технології розглядають як систему процесів, які відбуваються за різними механізмами, передусім, механо-хімічним та ударно-хвильовим через утворення й змикання кавітаційних бульбашок з формуванням кумулятивних струменів рідини, генеруванням ударних хвиль, локальним значним підвищенням тиску й температури тощо.

Гідродинамічні та теплофізичні ефекти, які супроводжують кавітацію, використовують для створення технологічних процесів, наприклад, отримання матеріалів з новими властивостями чи модифікування поверхонь, а також для вивчення кавітаційної корозії. Зокрема, кавітацію використовують для отримання наноматеріалів (наноалмазів [3], наночастинок кальциту [4]), матеріалів графенового і фулеренового типів [5]); очищення стічних вод [6]; у технологіях видобування й перероблення горючих копалин тощо.

Ознакою кавітаційних процесів є виділення великої кількості енергії внаслідок колапсу кавітаційних бульбашок. Для формування кавітаційних полів використовують ультразвукові (УЗ) та гідродинамічні (ГД) кавітатори [7]. Недоліками УЗ-кавітаторів є невелика продуктивність; нерівномірність кавітаційного поля та його локалізація біля поверхні випромінювача; стадія "виродженої кавітації". Застосування ГД-кавітаторів з різними кавітувальними елементами [1] дає змогу усунути ці недоліки й забезпечити ефективне оброблення як гетерофазних систем "рідина–тверді частинки", так і твердих поверхонь. Проте є недостатньо інформації щодо впливу конструктивних параметрів кавітаторів на ефективність внесення енергії, яка виділяється внаслідок кавітації, у систему. Цю енергію опосередковано можна оцінити калориметрично, оскільки усі види фізико-механіч-

них впливів (ерозія і диспергування твердої фази, ударні хвилі) та фізико-хімічної взаємодії (деструкція, рекомбінація радикалів тощо) значною мірою трансформуються у теплову енергію [8].

Мета роботи – проаналізувати залежності інтенсивності генерування теплової енергії від конструктивних параметрів кавітатора, зокрема, кількості кавітувальних елементів, їх діаметра, просторового розміщення.

Методики. Кавітаційні поля генерували ГД-струменевим кавітатором із соплами, розміщеними під певним кутом (кут атаки). Він давав змогу формувати суцільну область кавітації на деякій віддалі від сопел, що унеможливлювало їх ерозію. Сопла складались із циліндричної і конічної (конусність 1:1,18; $\alpha = 46$ degree) частин. Змінні параметри: кількість сопел (n) – 2...8; діаметр вихідної частини сопел (d , mm) – 1,0...2,2; кут атаки струменів (кут між осями сопел (β , degree)) – 50...175; тиск на вході у кавітатор (P , МПа) – 0,35...0,57. Потужність приводу насоса кавітатора – 1,1 kW. Кут атаки струменів регулювали шарнірним механізмом, а тиск – байпасом. Кількість теплової енергії, яка виділялась внаслідок кавітації, визначали калориметрично [9].

Розвиток кавітаційних явищ оцінювали також за методом сонохімічного аналізу, а саме, за характеристиками акустичного сигналу, генерованого кавітаційним полем. Його фіксували сферичним гідрофоном типу 8105, комутованим з персональним комп'ютером. Робочий діапазон частот гідрофона знаходився в межах $1 \cdot 10^{-1} \dots 1,6 \cdot 10^4$ Hz за його чутливості -205 (dB re 1 V)/mкPa. Графічне подання розвитку кавітаційних полів здійснювали за допомогою програми Adobe Audition 1.5.

Результати досліджень та їх обговорення. *Дослідження впливу конструктивних параметрів кавітувальних елементів (їх кількості, діаметра та просторової конфігурації) на теплову енергію.* Для визначення конструкції кавітатора, яка забезпечувала б максимальне трансформування кінетичної енергії струменів рідини у деформаційну та теплову, досліджували вплив кількості сопел, їх діаметра та кута атаки струменів на виділену теплову енергію. Аналізували багатофакторну залежність теплової енергії на основі енергетичних поверхонь, побудованих за допомогою програми автоматизованого проектування MathCad.

Спочатку аналізували вплив тиску на вході у кавітатор та кута атаки струменів на теплову енергію за різної кількості сопел ($d = \text{const} = 1,6$ mm) (рис. 1). Потім обирали діаметр сопел, який забезпечував максимальне використання підведеної до середовища енергії (рис. 2).

Із наведених залежностей видно, що зі збільшенням кількості сопел максимум значень теплової енергії зміщується в область більших кутів атаки струменів. Це зумовлено зменшенням віддалі між струменями до моменту їх зіткнення, і, відповідно, внесенням більшої частки енергії кожного струменя у кумулятивний, що й впливає на виділену теплову енергію. Максимуму теплової енергії (2,539 MJ) досягали за використання п'яти сопел з кутом атаки струменів 150° . Імовірно, за такої кількості сопел у результаті перетину струменів утворюється кавітаційний кластер геометричної форми, який забезпечує максимум силового впливу на структуру кластерів води, у яких одна молекула води у конденсованому стані утворює водневі зв'язки з чотирма сусідніми. П'ятичленні кільця молекул води мають майже плоску структуру, тому водневі зв'язки у них є слабші, ніж у гексагональних. Вони можуть виникати локально і короткочасно в місцях деструкції гексагональних кілець типів “ванна” або “крісло”, або в клатратах – у місцях концентрування енергії [10]. Свій внесок у такі процеси роблять і резонансні явища [11].

За кута атаки 150° під час зіткнення декількох струменів виникає спрямований від сопел результатний струмінь, в якому й збуджується кавітація. При цьому область кавітації формується на певній відстані від сопел, що унеможливорює

їх ерозію. За збільшення кута атаки до 175° ця область практично локалізована між соплами й може спричиняти їх руйнування.

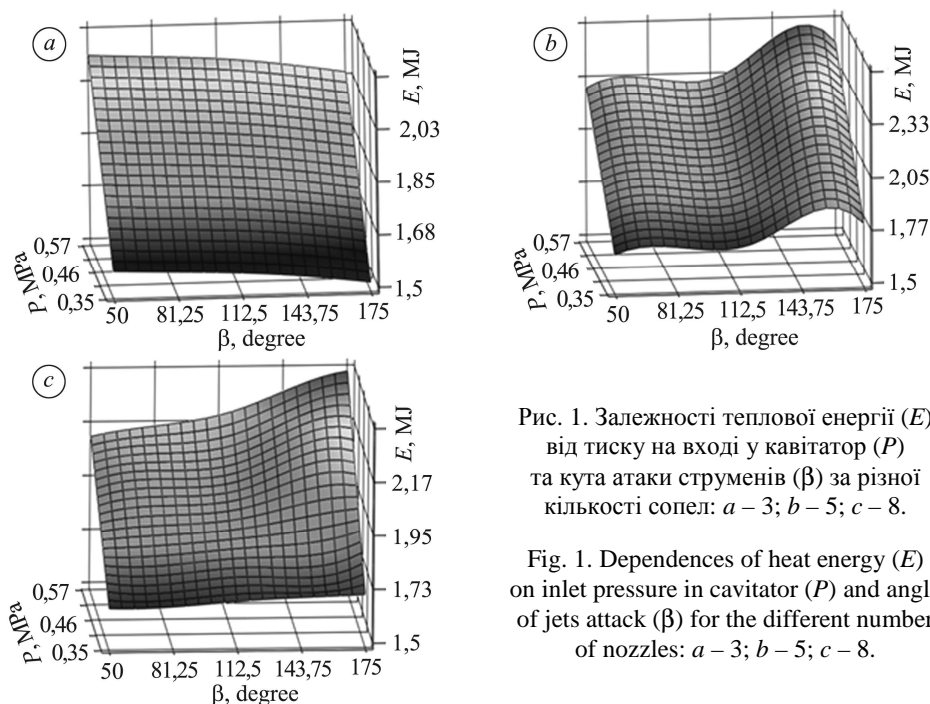


Рис. 1. Залежності теплової енергії (E) від тиску на вході у кавітатор (P) та кута атаки струменів (β) за різної кількості сопел: a – 3; b – 5; c – 8.

Fig. 1. Dependences of heat energy (E) on inlet pressure in cavitator (P) and angle of jets attack (β) for the different number of nozzles: a – 3; b – 5; c – 8.

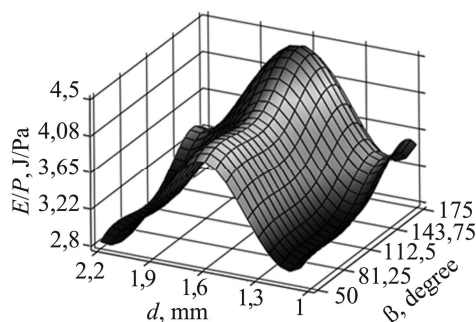


Рис. 2. Залежність питомої теплової енергії (E/P) від діаметра сопел (d) та кута атаки струменів (β) (кількість сопел – 5; $P = 0.57$ MPa).

Fig. 2. Dependence of the specific heat energy (E/P) on nozzle diameter (d) and angle of jets attack (β) (number of nozzles – 5; $P = 0.57$ MPa).

Екстремум значень питомої теплової енергії спостерігали за діаметра сопел 1,6 mm. За застосування сопел меншого діаметра (1; 1,3 mm) різко зростає гідрравлічний опір, а за більшого їх діаметра (1,9; 2,2 mm) зменшувалась осьова складова швидкості струменя на виході зі сопел і, відповідно, його кінетична енергія. Наведені чинники утруднювали збудження і розвиток кавітаційних процесів.

Отже, максимально ефективно енергію, підведену до водного середовища, використовували за таких параметрів кавітувальних елементів: кількість сопел – 5; діаметр сопла – 1,6 mm; кут атаки струменів – 150° ; тиск на вході у кавітатор – 0,57 MPa.

Дослідження впливу конструктивних параметрів сопел (їх кількості, діаметра та просторового розміщення) на розвиток кавітаційних полів методом сонохімічного аналізу. Для порівняння розвитку кавітаційних полів за різних конструктивних параметрів сопел використовували осцилограми їх акустичних сигналів. Типова осцилограма акустичного сигналу кавітаційного поля, сформованого гідродинамічним струменевим кавітатором, наведена на рис. 3. Рівень сигналу 0 dB відповідав максимально можливій амплітуді піків хвильової форми, за якої ще можливе фіксування значення звукового сигналу.

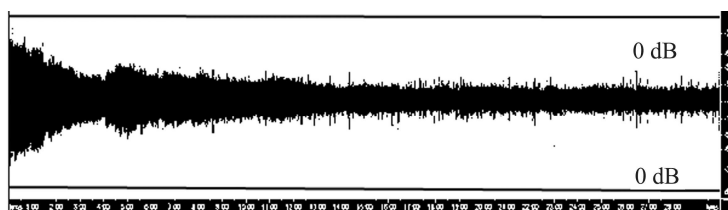


Рис. 3. Осцилограма акустичного сигналу кавітаційного поля, сформованого гідродинамічним струменевим кавітатором. Умови кавітаційного оброблення: кількість сопел – 5; \varnothing сопла – 1,6 mm; кут атаки струменів – 150°; тиск на вході у кавітатор – 0,57 МПа.

Fig. 3. Acoustic signal oscillogram of cavitation field, generated by hydrodynamic jet cavitator. Conditions of cavitation treatment: number of nozzles – 5; nozzle \varnothing – 1.6 mm; angle of jets attack – 150°; inlet pressure in cavitator – 0.57 MPa.

Як відомо, значення акустичного сигналу, виражене у децибелах, є пропорційне логарифму відношення фізичних величин першого порядку. В акустиці такою величиною є звуковий тиск. Зміну амплітуди звукового тиску кавітаційних полів у часі для різної кількості сопел (діаметр сопла – 1,6 mm; кут атаки струменів – 150°; тиск на вході у кавітатор – 0,57 МПа) наведено у таблиці.

Зміна амплітуди звукового тиску кавітаційних полів у часі для різної кількості сопел

Тривалість кавітаційного оброблення, s	Амплітуда звукового тиску, (dB re 1 V)/mkPa		
	Кількість сопел		
	3	5	8
300	–14	–11	–16
600	–15	–14	–21
1200	–21	–17	–24
1800	–21	–19	–24

Порівняння амплітуд звукового тиску кавітаційних полів для різної кількості сопел підтверджує, що найефективніше оброблення водного середовища – за використання п'яти сопел. Особливо чітко це видно під час зіставлення амплітуд звукового тиску за тривалості кавітаційного оброблення 1200 s, які дорівнюють –21; –17 і –24 (dB re 1 V)/mkPa для 3-х, 5-ти і 8-ми сопел, відповідно. Збільшення теплової енергії, яка виділяється під час кавітації, зі зменшенням модуля амплітуди звукового тиску пояснюється тим, що dB є відносною величиною, яка призначена для вимірювання в логарифмічному масштабі відношення двох величин (вимірюваної та базової).

ВИСНОВКИ

Для інтенсифікації різноманітних технологічних процесів і вивчення кавітаційної корозії, яка зумовлена фізико-механічною дією на тверді дисперсні частинки або поверхні, доцільно застосовувати кавітаційні поля, сформовані у ГД-струменевому кавітаторі. Істотними перевагами струменевих кавітаторів є формування суцільної області кавітації, що рівномірно розподіляється за січенням апарату, та відсутність ерозії робочих елементів.

Методами калориметричного та сонохімічного аналізів встановлено, що найефективніше використання підведеної до водного середовища енергії є за таких конструктивних параметрів струменевого ГД-кавітатора (у діапазоні зміни досліджуваних параметрів): кількість сопел – 5; діаметр сопла – 1,6 mm; кут атаки струменів – 150°; тиск на вході у кавітатор – 0,57 МПа. Для процесів у рідких середовищах з різними реологічними характеристиками застосування механізму зміни кута між соплами ГД-кавітатора дає змогу за параметрами акустичного сиг-

налу регулювати кут атаки струменів й, відповідно, забезпечувати найефективніше використання енергії потоків рідини. Перспективними є дослідження, спрямовані на вивчення впливу резонансних явищ на розвиток кавітаційних полів.

РЕЗЮМЕ. Проанализированы области применения ультразвуковых и гидродинамических генераторов кавитационных полей, в частности для осуществления физико-механических процессов. Эффективность развития кавитационных явлений при различных конструктивных параметрах струйного кавитатора оценили двумя методами – калориметрическим и сонохимическим анализом. Установлено конструктивные особенности кавитатора (количество и диаметр сопел, угол между ними и т.п.), при которых обеспечивается максимальное преобразование кинетической энергии струй водной среды в тепловую, которая выражает суммарный энергетический эффект протекания физико-механических и физико-химических процессов и явлений в кавитационном поле.

SUMMARY. The areas of application of ultrasonic and hydrodynamic emitters of cavitation fields, in particular for physical and mechanical processes, are analyzed. The effectiveness of cavitation for various design parameters of inkjet cavitator is assessed by two methods – calorimetric and by acoustochemical analysis. The cavitator design features (number and diameter of the nozzle, angle between them, etc.), for which a maximum conversion of kinetic energy jets of water environment into heat is provided, which expresses the total energy effect of physicochemical and physicochemical processes and phenomena occurring in the cavitation field, are established.

1. Анісімов В. В., Єрмаков П. П. Сучасні уявлення про кавітацію як явище та інтенсифікуючий фактор в хімічній технології // Вопросы химии и химической технологии. – 2012. – № 4. – С. 178–183.
2. Жулай Ю. А., Скосарь В. Ю. Кавитация как средство интенсификации технологических процессов. Опыт применения и перспективы (обзор) // Авиационно-космическая техника и технология. – 2013. – № 8 (105). – С. 7–15.
3. Лин Э. Э. О кластерном механизме синтеза алмаза в экстремальных условиях кавитации // Письма в журнал технической физики. – 2011. – 37, Вып. 13. – С. 9–13.
4. Hydrodynamic cavitation – assisted synthesis of nanocalcite [Електронний ресурс] / Sh. H. Sonawane, S. P. Gumfekar, K. H. Kate, S. P. Meshram, K. J. Kunte, L. Ramjee, C. M. Mahajan, M. G. Parande, and M. Ashokkumar // Int. J. Chem. Eng. – 2010. – Режим доступу: <http://www.hindawi.com/journals/ijce/2010/242963/ref/>.
5. Стебелева О. П. Кавитационный синтез наноструктурированного углеродного материала: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – Красноярск, 2011. – 20 с.
6. Яворський В. Т., Знак З. О., Мних Р. В. Вплив кавітаційного оброблення на фізико-хімічні властивості кальцію гідроксиду // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2013. – 49, № 3. – С. 80–85.
(Yavors'kyi V. T., Znak Z. O., Mnykh R. V. Influence of cavitation treatment on the physicochemical properties of calcium hydroxide // Materials Science. – 2013. – 49, № 3. – P. 368–374.)
7. Федоткин И. М., Немчин А. Ф. Использование кавитации в технологических процессах. – К.: Виш. шк., 1984. – 68 с.
8. Некоз О. І., Литвиненко О. А. Використання кавітації для генерування теплоти // Вібрації в техніці та технологіях. – 2009. – № 2 (54). – С. 102–104.
9. Знак З. О., Сухацький Ю. В., Мних Р. В. Дослідження залежності ефективності роботи гідродинамічного струменевого кавітатора від конструктивних параметрів кавітувального елемента // Вібрації в техніці та технологіях. – 2014. – № 2 (78). – С. 18–26.
10. Малафєєв М. Т., Воронцова Ж. В. Кластери у воді // Вісник Національного технічного університету “ХПІ”. Зб. наук. праць. Тематичний випуск: Нові рішення в сучасних технологіях. – 2011. – № 43. – С. 3–7.
11. Резонансная колебательная деструкция водородных связей как причина метастабильности эмульсий под действием магнитного поля / М. Ю. Долomatov, А. Г. Телин, Р. М. Сафуанова, Г. К. Борисов, З. И. Бурханова, С. В. Кисмерешкин, В. А. Докичев // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2014. – 10, № 3. – С. 114–123.

Одержано 18.01.2016