

УДК 620.193

Т.М. Вітенько, д-р техн. наук,
Н.М. Зварич, канд. техн. наук,
Т.В. Зарецька

ЕНЕРГЕТИЧНІ АСПЕКТИ ЗАСТОСУВАННЯ ГІДРОДИНАМІЧНИХ КАВІТАЦІЙНИХ ПРИСТРОЇВ У ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСАХ

Досліджено співвідношення коефіцієнтів, що характеризують частку енергії, трансформованої у тепло та витраченої на генерування кавітаційних ефектів у пристроях гідродинамічного типу. Встановлено взаємозв'язок їхньої зміни зі структурою потоку та ступенем кавітації.

The correlation of the coefficients describing the proportion of energy transformed into heat and consumed to generate cavitation effects in hydrodynamic-type devices is analyzed in the article. The relation between their changes and the structure of their flow and degree of cavitation is determined.

Вступ

Переважає більшість промислових технологій, які пов'язано з обробленням дисперсних систем, послідує декілька процесів: механічні, гідромеханічні, теплові, масообмінні тощо. Вони можуть бути визначальними чи другорядними. Зокрема, механічні та гідромеханічні процеси визначають диспергування та подрібнення дисперсної фази, що є важливим при емульгуванні чи гомогенізації. У технологіях, які пов'язано з екстрагуванням, розчиненням і кристалізацією, важливим є тепломасообмін, який визначається міжфазним перенесенням енергії чи маси [1].

Слід зазначити, що вибір того чи іншого методу інтенсифікації технологічного процесу повинен відповідати тому рівню, який є визначальним. Так для перенесення речовини, що відбувається на молекулярному рівні, найефективнішим є фізичний вплив саме на цьому рівні. Тому найпоширенішим способом інтенсифікації процесів екстрагування, розчинення, абсорбції є підвищення температури. Разом з тим оптимальний температурний інтервал для кожного окремого процесу є обмеженим і зазвичай добре дослідженим, тому найбільш ефективним за таких умов може бути підведення зовнішньої енергії. Наприклад: механічне перемішування, вплив вібрацій, акустичних чи імпульсних коливань, ефектів гідродинамічної кавітації, електричних розрядів. Незалежно від способу введення енергії, як результат можна відзначити: вимушений відносний рух фаз, деформацію і подрібнення твердих частинок, збільшення часу перебування дисперсної частинки в активному об'ємі, рівномірний розподіл дисперсних фаз [2].

Водночас необхідно зазначити, що залежно від особливостей вибраного методу та конструкції пристрою, що забезпечує введення енергії, інтенсифікація відбувається переважно на ділянці введення енергії й значна її кількість витрачається непродуктивно. Тому для вибору методу інтенсифікації та пристрою для його здійснення важливою є оцінка розподілу енергії у системі та визначення корисної (ефективної) енергії саме для визначеного процесу.

Теоретичні передумови

Можливість раціонального застосування кавітаційних ефектів для спрямованого керування кінетикою протікання фізичних, гідромеханічних, тепломасообмінних, хімічних, біохімічних та інших процесів потребує досконалого розуміння природи кавітаційних ефектів, механізму кавітаційної дії та розподілу споживаної енергії. Попри велику кількість експериментальних і теоретичних досліджень щодо вивчення механізму різноманітних кавітаційних ефектів, на сьогодні панує традиційна точка зору, що переважний вплив на перебіг будь-яких процесів, як на макро-, так і на мікрорівні, чинять саме руйнівні гідромеханічні ефекти, що виникають під час руйнування кавітаційних бульбашок [3]. У роботах [4] доведено необхідність урахування взаємозв'язку сукупності різноманітних механізмів — механічних, термічних, хімічних, які супроводжують кавітаційну дію в кожному окремому випадку. Необхідність оцінки енергетичних перетворень існує вже давно, оскільки визначення критеріїв, на основі яких можна співставити енергетику механічних, хімічних та термічних факторів, дає змогу вірно вибрати не тільки метод інтенсифікації, але й пристрій для його здійснення.

Експериментальні дослідження

За кавітаційного режиму, що супроводжується утворенням парогазової фази за рахунок відривання окремих струмин рідини поряд із утворенням у рідині крупномасштабних пульсацій, виникають дрібномасштабні пульсації, кумулятивні струминки, градієнти тисків і температур, ініціюються хімічні процеси, які пов'язані з пульсацією і сплескуванням парогазових порожнин. Для здійснення вищенаведених ефектів необхідно витратити енергію, від величини якої буде залежати загальне енергоспоживання системи

$$E_{\text{заг}} = E_n + E_{\text{ef}}, \quad (1)$$

де E_n — енергія, що трансформується від пульсацій з більшими масштабами в енергію з меншими масштабами і перетворюється у теплову, Дж; E_{ef} — енергія, витрачена на кавітаційні ефекти, Дж.

Загальну енергію, яку споживає система, вимірювали ватметром і перераховували з врахуванням часу оброблення.

Водночас частина енергії перетворюється у теплову за рахунок тертя окремих струмин (шарів рідини). Цю енергію визначали експериментально, вимірюючи зміну температури рідини впродовж роботи пристрою, забезпечивши теплоізоляцію системи (рис. 1 і 2) та розраховували за рівнянням

$$E_n = m \cdot c \cdot (t_k - t_0) \tau, \quad (2)$$

де m — маса рідини, що обробляється у пристрої, кг; c — теплоємність, Дж/(кг · °С); t_k — температура середовища після оброблення, °С; t_0 — початкова температура рідини, °С; τ — час оброблення, с.

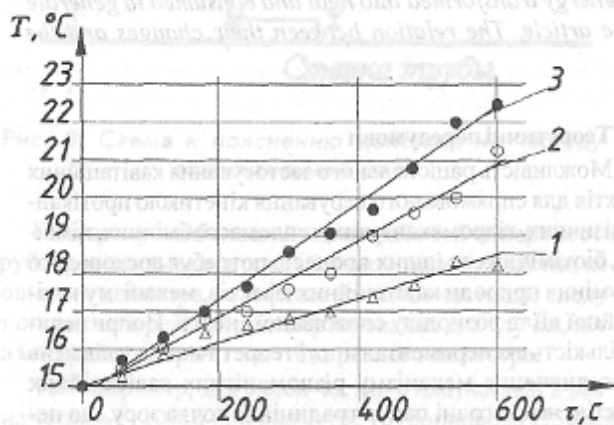


Рис. 1. Залежність температури води від часу її оброблення у кавітаційному пристрої динамічного типу [4] за різних швидкостей руху рідини: 1 — $v = 10$ м/с; 2 — $v = 12$ м/с; 3 — $v = 23$ м/с.

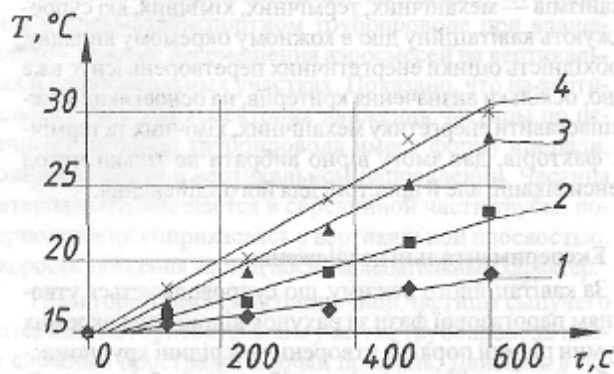


Рис. 2. Залежність температури води від часу її оброблення у кавітаційному пристрої статичного типу [4] за різних швидкостей руху рідини: 1 — $v = 10$ м/с; 2 — $v = 11$ м/с; 3 — $v = 14$ м/с; 4 — $v = 24$ м/с.

Друга частина споживаної енергії $E_{сп}$ витрачається безпосередньо на утворення макро- і мікропотоків, кавітаційних ефектів (виникнення інтенсивних полів пульсуючих тисків та хвиль розрідження — стиснення під час пульсації парогазових каверн та мікробульбашок; утворення

кумулятивних мікрострумин в асиметричному полі тисків у заключній стадії сплескування кавітаційних бульбашок; утворення в потоці за кавітуючим тілом турбулентних зон, заповнених завихреннями та мікробульбашками, що випромінюють акустичні хвилі широкого діапазону частот; фазові переходи, що протікають на поверхні кавітаційних бульбашок; пульсації температури парогазового вмісту кавітаційних бульбашок); ініціювання хімічних реакцій.

Для оцінки частки енергії, трансформованої у теплову, розраховували коефіцієнт k_T за рівнянням (3)

$$k_T = E_n / E_{заг}. \quad (3)$$

Відповідно частку енергії, що забезпечує кавітаційні ефекти оцінювали коефіцієнтом $k_{кав}$

$$k_{кав} = 1 - k_T. \quad (4)$$

Результати вимірювань і розрахунків наведено у табл. 1.

Результати досліджень

З наведених у табл. 1 результатів видно, що співвідношення коефіцієнтів розподілу енергії на теплові та кавітаційні ефекти насамперед залежить від структури потоку (ступеня кавітації). Відрізняються ці параметри для динамічного та статичного пристрою за однакових швидкостей рідини. Слід зауважити, що за відсутності кавітації (турбулентний режим) коефіцієнт перетворення енергії у теплову низький і визначається величиною турбулізації потоку та дисипацією енергії на тертя завихрень та струмин рідини.

Для пристрою динамічного типу найбільший кавітаційний коефіцієнт відповідає режиму бульбашкової кавітації. Це можна пояснити утворенням поля мікробульбашок, пульсації і руйнування яких забезпечують інтенсифікуючу дію на технологічне середовище [5]. За режиму змішаної кавітації $k_{кав}$ зменшується. Це можна пояснити зливанням бульбашок у каверни, які, наприклад, менш інтенсивно впливатимуть на процеси, що мають перебіг на молекулярному рівні. Результати, які наведено у роботі [4] підтверджують це.

Для пристроїв статичного типу результати мають дещо іншу картину. Так, найбільший кавітаційний коефіцієнт спостерігається для режиму змішаної кавітації, а тепловий коефіцієнт поступово зростає. Візуальні дослідження структури потоку, що рухається зі швидкістю 24 м/с засвідчили, що за таких умов справедливе співвідношення між довжиною каверни й діаметром перешкоди — $L = 2d$, що відповідає граничному режиму переходу до суперкавітації. За таких умов каверна розпадається на більшу кількість парогазових мікробульбашок порівняно до структури потоку бульбашкової кавітації [3]. Зростання теплового фактора за таких умов, можна пояснити збільшенням кількості кумулятивних мікроструменів [6].

Висновки

На основі проведених експериментальних досліджень встановлено співвідношення теплового та кавітаційного факторів, що пов'язані із трансформацією споживаної енергії у кавітаційних пристроях гідродинамічного типу.

Таблиця 1
Коефіцієнти перетворення енергії

№ з/п	Особливості режиму оброблення середовища							
	Пристрій динамічного типу				Пристрій статичного типу			
	Швидкість потоку, м/с	Ступінь кавітації	Тепловий коефіцієнт	Кавітаційний коефіцієнт	Швидкість потоку, м/с	Ступінь кавітації	Тепловий коефіцієнт	Кавітаційний коефіцієнт
1	9	відсутня	0,15	–	10	відсутня	0,1	–
2	10	вихрова	0,45	0,55	11	вихрова	0,25	0,75
3	12	бульбашкова	0,56	0,44	14	бульбашкова	0,4	0,6
4	23	змішана	0,58	0,42	24	змішана	0,35	0,65

Встановлено закономірності зміни теплового та кавітаційного коефіцієнтів залежно від ступеню кавітації, що пов'язано зі структурою потоку.

Література

1. Долинский, А.А. Теплообмен и гидродинамика в парожидкостных дисперсных средах. Теплофизические основы дискретно-импульсного ввода энергии / А.А. Долинский, Г.К. Иваницкий — К.: Наукова думка. — 2008. — 381 с.
 2. Федоткин, И.М. Интенсификация технологических процессов пищевых производств / И.М. Федоткин, Б.Н. Жарик, Б.И. Погорельский. — К.: Техника, 1984. — 176 с.

3. Немчин, А.Ф. Новые технологические эффекты теплопереноса при использовании кавитации // Пром. теплотехника. — 1997. — Т. 19, № 6. — С. 39 — 47.
 4. Вітенько, Т.М. Гідродинамічна кавітація у масообмінних, хімічних і біологічних процесах: монографія. — Тернопіль, ТДТУ, 2009. — 224 с.
 5. Балабудкин, М.А. Роторно-пульсационные аппараты в химико-фармацевтической промышленности. — М.: Медицина, 1983. — 160 с.
 6. Козюк, О.В. Взаимосвязь эрозивной и технологической активности гидродинамической кавитации / О.В. Козюк, А.И. Некоз // Проблемы трения и изнашивания: Респ. межвед. научн.-техн. сб. — 1990. — Вып. 38. — С. 17—20.

Надійшла 20.05.2011 р.

Рис. 2. Емкостна модель динамічного пристрою

Рис. 3. Проекція нормальній напрямку