

## СУЧАСНІ УЯВЛЕННЯ ПРО КАВІТАЦІЮ ЯК ЯВИЩЕ ТА ІНТЕНСИФІКУЮЧИЙ ФАКТОР В ХІМІЧНІЙ ТЕХНОЛОГІЇ

ГВУЗ «Украинский государственный химико-технологический университет», м. Дніпропетровськ

Розглянуто фізичні основи явища кавітації, зокрема причини та умови її виникнення, явища та ефекти, які її супроводжують. Представлено конструкції типових пристроїв для створення кавітації в наукових та виробничих цілях.

### Вступ

Сучасний розвиток хімічної промисловості тісно пов'язаний з інтенсифікацією процесів хімічної технології. Існує велика кількість засобів для збільшення швидкості та ефективності процесу, зменшення енергомісткості, тощо. До них відносяться гідродинамічні, вібраційно-акустичні, мембранні, кавітаційні, магнітні та інші технології [1].

Кавітаційні технології вже на даний момент знайшли широке застосування в багатьох галузях хімічної промисловості, зокрема в загальній хімічній, харчовій, нафтохімічній промисловостях. Це обумовлено високою ефективністю процесів із застосуванням кавітації при їх порівняно простому інженерному оформленні. Крім того, кавітаційні процеси в основному перспективні з точки зору техніки безпеки та екологічності.

Найбільш поширеним застосуванням кавітації є інтенсифікація процесів тонкого перемішування, емульгування, диспергування, абсорбції [2,3]. Розповсюдженим є застосування кавітації в процесі знезараження рідин. Також за допомогою кавітації інтенсифікують протікання хімічних реакцій [4].

Поширення застосування кавітації в промисловості обумовлює необхідність у подальших наукових дослідженнях цього явища як з фундаментальної, так і з прикладної сторони.

### Фізична сутність явища кавітації

На відміну від газів, рідина, як і тверде тіло, має міцнісні характеристики. Як наслідок, при утворенні в рідині певних граничних напружень рідина повинна розриватись [5]. Утворені при розриві порожнини швидко заповнюються паром чи розчиненими в рідині газами. В абсолютній більшості випадків, коли говорять про кавітацію, то мають на увазі парогазову кавітацію, оскільки для виникнення чистої парової кавітації рідина повинна бути очищеною від мікробульбашок газу, що знаходяться в звичайній рідині. Абсолютно повне очи-

щення рідини від газу в реальних умовах неможливе. Щоб виявити, наскільки наявність в рідині мікробульбашок газу впливає на можливість виникнення в цій рідині кавітації, розглянемо деякі дані з міцності рідини при розтяганні.

Теоретична міцність чистих рідин дуже велика. Для утворення у воді порожнини радіусом порядку кінетичного радіуса молекули води (близько  $10^{-7}$  мм) необхідно створити розтягуючий тиск порядку  $1,5 \cdot 10^9$  Па [6]. Для порівняння, цей тиск вище межі міцності більшості сталей [7].

Незважаючи на високу теоретичну міцність рідин на розрив, реальна їх міцність на 3–4 порядки менша, ніж теоретична. За даними [8], лише в спеціально підготовлених зразках води досягнута кавітаційна міцність 27,5 МПа. Також за експериментальними даними Кнеппа [9] при обробці води тиском її опір розтягуючим напруженням досягав 14–21 МПа в залежності від інтенсивності обробки.

Зменшення реальної міцності відносно теоретичної відбувається за рахунок того, що в реальній рідині присутні мікробульбашки газу, які порушують її суцільність [10]. Ці мікробульбашки називають кавітаційними зародками. Аналогією впливу мікробульбашок на міцність рідини є вплив мікронеоднорідностей та порушень кристалічної решітки в металах. Крім мікробульбашок, в реальній рідині знаходяться мікроскопічні тверді частинки, на яких утримуються адсорбовані гази [11]. Такі частинки також є потенційними зародками кавітації.

Виходячи з вищесказаного, процес виникнення кавітації суттєво залежить від чистоти рідини. Крім того, в реальній рідині процес кавітації характеризується не чистим розривом рідини, а збільшенням в розмірі вже існуючих мікробульбашок. Саме це явище в сучасному розумінні називають кавітацією. Утворені пустоти називають кавітаційними бульбашками або кавернами.

З точки зору практичного застосування,

сутність явища кавітації полягає не стільки в утворенні і рості кавітаційних бульбашок в рідині, скільки в їх зникненні. Після зростання бульбашка рано чи пізно вийде з зони низького тиску. При цьому бульбашка почне зменшуватись в розмірах і в решті решт відбудеться її схлопування.

При схлопуванні кавітаційної бульбашки виникає сферична ударна хвиля. Крім того, якщо схлопування кавітаційної бульбашки відбувається поблизу твердої поверхні, то виникає мікроскопічний кумуляційний струмінь [5]. Такий струмінь призводить до ерозійного руйнування поверхні.

Таким чином, кавітація — явище виникнення в рідині парових, газових або парогазових бульбашок із зародків під дією локальних низьких тисків з можливим наступним їх схлопуванням.

#### Загальна історія дослідження кавітації

Явище кавітації відоме людству досить давно. Вперше явище кавітації було теоретично передбачено Рейнольдсом [12,13]. На практиці ж явищем кавітації зацікавились в кінці ІХХ століття при проведенні випробувань морських кораблів. Спочатку це явище розглядалося як априорі негативне, що сприяє руйнуванню поверхонь гребних гвинтів суден, шуму та вібраціям. До 40-х років минулого століття вивчення кавітації йшло досить повільно. Це було пов'язано з складністю її отримання в лабораторних умовах: зокрема складно з технічної точки зору було забезпечити велику швидкість руху рідини, достатню для утворення кавітації. І тільки після 40-х років почалося інтенсивне її вивчення. В період з 40-х по 70-ті роки значна увага приділялась кавітації, що виникає при обтіканні тіла рідиною. Згодом проводяться дослідження не тільки в контексті зменшення негативного впливу кавітації на роботу гребних гвинтів, гідротурбін, елементів насосів, але і з метою отримання корисних ефектів, що виникають при кавітації. З кінця 20 століття і по наш час все більший розвиток отримує використання кавітації для генерації тепла.

#### Основні математичні моделі динаміки кавітаційної бульбашки

На даний момент існує багато математичних моделей, що описують кавітацію в рідині. Більшість з них описує поведінку поодинокі сферичної бульбашки, зокрема зміну її розмірів під дією змінного тиску. Ці моделі базуються на теорії пульсацій поодинокі сферичної бульбашки [14].

Припущення, що накладаються теорією пульсацій поодинокі сферичної бульбашки:

— бульбашка розташована так далеко від інших бульбашок, що взаємодією між ними можна знехтувати;

— бульбашка розташована так далеко від наявних в рідині мікрочасток, що взаємодією між ними можна знехтувати;

— бульбашка розташована так далеко від стінок ємності, що взаємодією між ними можна знехтувати;

— бульбашка розташована так далеко від поверхні розділу фаз, що взаємодією між ними можна знехтувати;

— форма бульбашки є сферичною.

Вперше математичне описання процесу стискання кавітаційної бульбашки отримано Релеєм. Ця модель описує стискання вакуумної, тобто пустої бульбашки. При цьому модель враховує тільки інерційні сили і нехтує такими важливими факторами, як в'язкість, поверхневий натяг та ін.

Нижче наведено загальний вигляд рівняння Релея [14]:

$$R\ddot{R} + \frac{3}{2}\dot{R}^2 = -\frac{P_0}{\rho},$$

де  $R$  — функція радіуса бульбашки від часу  $t$ ;  $P_0$  — статичний тиск в рідині;  $\rho$  — густина рідини.

Фактично модифікацією рівняння Релея є рівняння Релея-Плессета [14]:

$$R\ddot{R} + \frac{3}{2}\dot{R}^2 = \frac{1}{\rho} \left( P_g - P_0 - P(t) - \frac{2\sigma}{R} - \frac{4\mu\dot{R}}{R} \right),$$

де  $P_g$  — тиск парогазової суміші в бульбашці;  $P_0$  — статичний тиск в рідині;  $P(t)$  — зовнішній змінний тиск;  $\mu$  — коефіцієнт динамічної в'язкості рідини;  $\sigma$  — коефіцієнт поверхневого натягу рідини.

Дане рівняння дозволяє додатково врахувати тиск газової суміші в бульбашці, змінний зовнішній тиск, в'язкість та поверхневий натяг рідини.

Рівняння Релея-Плессета є порівняно простим, але в той же час воно досить точно описує процес росту та схлопування бульбашки.

Крім рівняння Релея-Плессета існує велика кількість подібних моделей динаміки кавітаційної бульбашки, зокрема рівняння Нолтінга-Нейпараса, Херінга-Фліна, Кірквуда-Бете. Також існують більш спеціальні математичні моделі, які враховують теплопередачу через стінку бульбашки, взаємодію кавітаційних бульбашок та ін. Проте на даний момент не існує математичної моделі кавітації, яка враховувала б одночасно всі фактори, які впливають на цей процес.

#### Основні класифікації кавітації

Прояви кавітації досить різноманітні. Кавітація на лопаті судна на перший погляд, сильно відрізняється від акустичної кавітації, створеної магнітострикційним випромінювачем, а кавітація в соплі суттєво відрізняється від кавітації, створеної лазерним променем. Проте всі ці випадки відносяться до одного й того самого явища — кавітації, а відрізняються за способом її створення. Крім того, кавітацію класифікують за її інтенсивністю, типом, формою кавітаційної зони та ін. Розглянемо основні види способи класифікації проявів кавітації.

Розрізняють наступні форми кавітації: приєднана, бульбашкова, у вигляді хмари та вихрова [15].

Приєднана форма кавітації характеризується тим, що кавітаційна зона утворюється за тілом, яке обтікає рідина.

Бульбашкова форма кавітації характеризується пульсаціями та схлопуванням майже сферичних кавітаційних бульбашок, які є більш-менш ізольованими одна від одної. Така форма кавітації виникає при відсутності різких градієнтів тиску.

Кавітація у вигляді хмари характеризується тим, що кавітаційні бульбашки виникають в певному об'ємі рідини, який може мати різноманітні форми.

Вихрова кавітація характеризується утворенням вихрів, що послідовно рухаються один за одним [16,17,18]. В центрах вихрів утворюються каверни, що не прилягають до твердої поверхні.

Розрізняють однобульбашкову та багатобульбашкову кавітацію. На практиці, як правило, застосовують багатобульбашкову кавітацію, оскільки її значно легше отримати. Однобульбашкову кавітацію отримують в лабораторних умовах, як правило, при акустичній кавітації, за допомогою фокусування акустичних хвиль в одній точці рідини [5,14].

З точки зору хімічного складу речовини в бульбашці, кавітацію ділять на парову та газову. При паровій кавітації внутрішнє середовище бульбашки заповнене водяною парою, а при газовій — сумішшю газів, що присутні в рідині в якості зародка або розчинені в ній. Відповідно кавітаційні бульбашки називають паровими або газовими. В реальних умовах, як правило, мають справу з парогазовими бульбашками, які заповнені сумішшю газів і водяною парою.

За способом отримання кавітацію розділяють на гідродинамічну та акустичну [14]. При гідродинамічній кавітації знижений тиск для утворення кавітації в рідині утворюється за рахунок збільшення швидкості рідини відносно стінок каналу або об-

тічного тіла. При акустичній кавітації зниження тиску відбувається циклічно під дією акустичних хвиль.

Також за стадіями розвитку, як правило, розрізняють початкову, розвинену та суперкавітацію [15]. Суперкавітація вимагає найбільш потужного впливу на середовище, але при цьому викликає найбільш інтенсивну кавітаційну обробку. У виробничих умовах доцільно проводити кавітаційні процеси саме в режимі суперкавітації.

*Ефекти, які виникають при кавітації*

Кавітація є інтенсивним процесом, що впливає на середовище, в якому цей процес відбувається. Фактично спектр впливів кавітації на середовище і призвів до розширення її використання в багатьох галузях промисловості.

Кількість ефектів, що мають місце при кавітації є досить великою. Тому їх варто розділити на первинні, які спостерігаються при будь-якому кавітаційному процесі, та вторинні, які часто пов'язані з конкретною групою технологічних процесів і потребують наявності відповідних додаткових умов в зоні кавітації [11].

Основні ефекти, що виникають при кавітації надані в таблиці.

Низка вторинних ефектів можливо продовжити. Зокрема кавітація використовується для багатьох цілей в медицині, проте ці застосування не варті уваги з точки зору хімічної технології.

*Типові пристрої для створення кавітації*

На даний момент існує велика кількість пристроїв, які дозволяють отримувати кавітацію в рідині. Нижче розглянуто найбільш типові пристрої, огляд яких дозволив би скласти загальну думку про сучасний розвиток кавітаційних технологій.

Одним з найбільш простих пристроїв для створення кавітації є сопло Вентурі. Сопло Вентурі (рис. 1) складається з трьох частин: вхідної частини 1, вузької частини 2 та дифузійної частини 3.

#### **Ефекти, що виникають при кавітації**

Первинні ефекти
Виникнення імпульсів тиску внаслідок схлопування кавітаційних бульбашок
Випромінювання звукових імпульсів різної інтенсивності і частоти
Підвищення температури в зоні схлопування, і, як наслідок, нагрів всієї рідини за рахунок теплопровідності
Конденсація парів рідини в зоні підвищеного тиску
Дегазация рідини внаслідок підвищення тиску в кавітаційній зоні
Люмінесценція – явище випромінювання світла при схлопуванні кавітаційної бульбашки
Змінення електричної провідності
Змінення електричного потенціалу
Змінення тепловіддачі та масовіддачі від рідини
Змінення рН середовища
Вторинні ефекти
Емульгування в кавітаційній зоні
Диспергування твердих речовин
Ерозія твердого матеріалу
Очищення поверхні матеріалу
Хімічна дія: прискорення та ініціювання реакцій
Руйнування великих молекул і розрив полімерних ланцюгів
Очищення рідин від біологічних забруднень

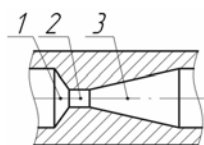


Рис. 1. Схема сопла Вентурі: 1 – конфузорна частина; 2 – вузька частина; 3 – дифузорна частина

Потік рідини, який проходить через сопло Вентурі значно збільшує свою швидкість у вузькій частині 2. При цьому тиск знижується і в рідині виникають кавітаційні бульбашки. При русі рідини в дифузорній частині тиск у ній поступово зростає, що призводить до схлопування кавітаційних бульбашок. Для інтенсифікації процесу кавітації в соплі Вентурі часто в різних його частинах встановлюють нерухомі кавітатори або ускладнюють форму сопла [19,20].

Пристрої з нерухомим кавітатором [21] характеризуються тим, що кавітація виникає за кавітатором при обтіканні його рідиною з великою швидкістю. Зона кавітації має вигляд приєднаної каверни. Приклад пристрою з нерухомим кавітатором наведено на рис. 2.

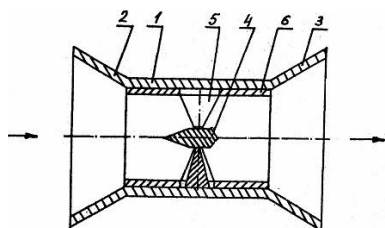


Рис. 2. Пристрій з малим нерухомим кавітатором [21]: 1 – циліндричний трубопровід; 2 – патрубок підводу; 3 – патрубок відводу; 4 – ступиця; 5 – кавітатори; 6 – втулка

Принцип роботи пристроїв сиренного типу [22,23,24] базується на почерговому закритті чи відкритті отворів ротора та статора (рис. 3).

Даний пристрій (рис. 3) сиренного типу працює наступним чином. У вхідний патрубок 19 подають робочу рідину. Вона рухається в пристрої в напрямках, вказаних стрілками. Після цього вмикають електродвигун, який обертає вал 5. Як наслідок, зовнішня каблучка 9 починає обертатися. В пристрої починають діяти відцентрові сили, що намагаються викинути рідину з радіальних отворів до внутрішньої поверхні корпусу 13. При перекритті отвора суцільною поверхнею каблучки 10 в ньому виникає розрідження, в якому розвивається кавітація. При кавітаційному розриві рідини суцільність стовпа рідини в отворі порушується і рідина викидується до внутрішньої поверхні корпусу 13. Удар об поверхню сприяє інтенсивному схлопуванню кавітаційних бульбашок. Після викиду порції рідини з отвору відбувається чергове заповнення отвору новою порцією рідини при співпадінні отворів рухомої та нерухомої каблучок.

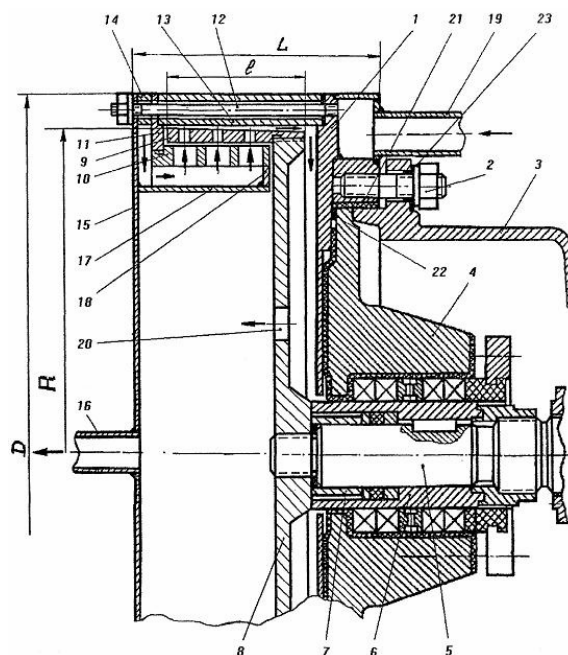


Рис. 3. Роторний пристрій сиренного типу [24]: 1 – опорний вузол; 2, 12 – шпилька; 3 – корпус; 4 – чепцевий вузол; 5 – вал; 6 – змінний кільце; 7 – чоп; 8 – рухомий диск; 9 – рухома каблучка; 10 – нерухома каблучка; 11 – нерухомий диск; 13 – обод; 14 – проміжна каблучка; 15 – днище; 16 – штуцер; 17 – каблучка-перегородка; 18 – шайба; 19 – патрубок підводу рідини; 20 – отвори; 21 – теплоізолююча каблучка; 22 – прокладка; 23 – теплоізолююча шайба

Вихрові кавітаційні пристрої [25,26,27] відрізняються тим, що кавітація виникає в розрідженні в центрі вихру рідини. Типова конструкція вихрового пристрою для створення кавітації надана на рис. 4.

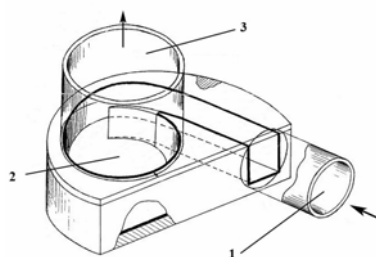


Рис. 4. Однопоточний вихровий кавітаційний пристрій [25]: 1 – вхідна частина; 2 – ділянка виникнення кавітації; 3 – вихідна частина

Потік рідини проходить через вхідну частину 1 і потрапляє у завихрювач 2. У завихрювачі швидкість рідини значно зростає, а в центрі потоку утворюється розрідження і кавітація. Оброблена рідина відводиться через вихідну частину 3.

Також типовим є поршневі пристрої для створення кавітації [28], наданий на рис. 5.

Даний пристрій працює наступним чином. При

обертанні колінчастого вала 3 від двигуна 5 поршень 2 отримує зворотно-поступальний рух. При русі поршня вниз частина рідини витісняється з порожнини під поршнем в порожнину над поршнем через отвори в поршні. При протіканні рідини через ці отвори її швидкість збільшується, тиск в ній зменшується, і в рідині виникає кавітація. Після виходу рідини з отвору кавітаційні бульбашки схлопуються.

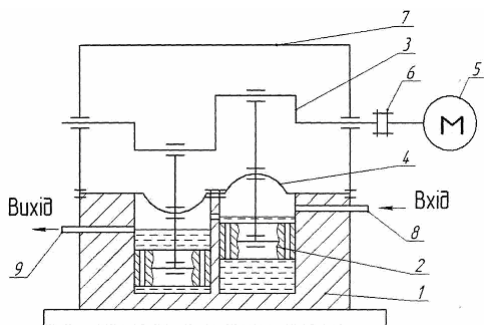


Рис. 5. Поршневий пристрій для створення кавітації [28]: 1 – корпус; 2 – поршень; 3 – колінчастий вал; 4 – захисна мембрана; 5 – двигун; 6 – муфта; 7 – кришка; 8 – патрубок підводу рідини; 9 – патрубок відводу рідини

Крім того, при русі поршня тиск в одній з порожнин збільшується, а в іншій зменшується. Таким чином, при достатньому його зменшенні принципово можлива кавітація у всьому об'ємі цієї порожнини.

Гідродинамічний свисток [5,29] є одним з найпростіших способів створення кавітації за допомогою акустичних коливань. Принципова схема гідродинамічного свистка надана на рис. 6.

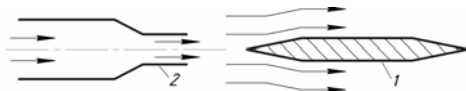


Рис. 6. Схема роботи рідинного свистка: 1 – резонуючий елемент; 2 – сопло

Принцип роботи полягає в тому, що струмінь води, який набігає з великою швидкістю на резонуючий елемент 1 через сопло 2, призводить до коливань цього елемента і генерації звукових хвиль, і, як наслідок, зон низького та високого тиску в рідині.

Розповсюдженими є пристрої з п'єзоелектричними або магнітострикційними випромінювачами. Пристрій з п'єзоелектричними випромінювачами надано на рис. 7 [30].

Робота пристрою полягає в тому, що коливання від п'єзоелектричного випромінювача 3 через стінку основної труби 1 передаються оброблюваній рідині, у якій виникає рівномірно розподілена по об'єму кавітація.

Подібним чином працюють пристрої з магнітострикційними випромінювачами [31], тільки в

даному випадку генератором коливань є не п'єзоелектричний елемент, а феромагнетик, який коливається під дією магнітострикційного ефекту.

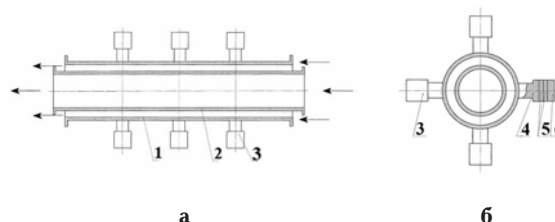


Рис. 7. Пристрій для створення кавітації з п'єзоелектричними випромінювачами [30]: а – поздовжній переріз; б – поперечний переріз; 1 – основна труба; 2 – додаткова труба; 3 – п'єзоелектричний випромінювач; 4 – трансформатор швидкості; 5 – п'єзокільце; 6 – демпфер

Окремо слід виділити пристрої для створення електророзрядної кавітації [32]. В таких пристроях кавітація створюється за рахунок проходження електричних розрядів високої напруги між зануреними в рідину електродами.

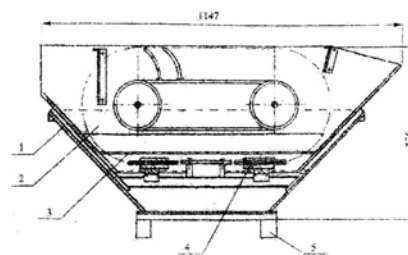


Рис. 8. Схема установки для створення електророзрядної кавітації [32]: 1 – бак; 2 – конвейер; 3 – захисна сітка; 4 – електроди; 5 – амортизатор

Існує велика кількість інших пристроїв для створення кавітації, які працюють подібним або зовсім іншим чином. Тим не менш, більшу частину пристроїв для створення кавітації можна розділити так само, як і саму кавітацію по способу її створення – на гідродинамічні і акустичні пристрої. В гідродинамічних пристроях кавітація створюється за допомогою відповідної динаміки рідини, а в акустичних – за рахунок розрідження внаслідок проходження коливань через рідину.

### **Висновки**

Спектр способів використання кавітації дуже широкий. Крім хімічної промисловості, кавітацію використовують чи борються з нею в гірничій справі, у медицині, і навіть у спорті.

Тим не менш кавітація на даний момент не є досконало вивченим явищем. Це підтверджується тим, що не існує універсальної математичної моделі кавітації, суперечливими є дані про максимальну температуру та тиск всередині бульбашки під час її схлопування, нерозв'язані деякі енергетичні аспекти виділення тепла під час кавітації. Через це кавітація є перспективним об'єктом для досліджень будь-якого виду, починаючи від суто

прикладних та експериментальних до фундаментальних теоретичних.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Федоткин И.М., Жарик Б.Н., Погоржельский Б.И. Интенсификация технологических процессов пищевых производств. — К.: Техніка, 1984. — 176 с.
2. Абсорбция оксидов азота водой активированной посредством кавитации / Мороз Н.А., Ворожбян М.И., Лобойко А.Я. и др. // Вісник НТУ «ХПІ» Тематичний вип.: Хімія, хімічна технологія та екологія. — 2010. — № 52. — С. 90-94.
3. Вітенько Т.М., Гумницький Я.М. Вплив кавітаційного подрібнення твердої фази на кінетику розчинення // Вопр. химии и хим. технологии. — 2009. — №2. — С. 161-166.
4. Вітенько Т. М. Експериментальна оцінка хімічної дії гідродинамічної кавітації // Вісник ТДТУ. — 2009. — Т.14. — № 2. — С.165-170.
5. Маргулис М. А. Звукохимические реакции и сонолюминисценция. — М.: Химия, 1986. — 288 с.
6. Birkhoff G., Zarantonello E. H. Jets, wakes and cavities. — New York: Academic press, 1957. — 466 p.
7. Ануриев В. И. Справочник конструктора-машиностроителя: в 3-х т.: Т.1. — М.: Машиностроение, 1980. — 728 с.
8. Briggs L.J. The limiting negative pressure of five organic liquids and the 2-phase system, water-ice // J. Appl. Phys. — 1950. — Vol.21. — p.721.
9. Карелин В. Я. Кавитационные явления в центробежных и осевых насосах. — М.: Машгиз, 1963, 2-е изд. 1975. — 336 с.
10. Маргулис М. А. Звукохимические реакции и сонолюминисценция. — М.: Химия, 1986. — 288с.
11. Арзуманов Э. С. Кавитация в местных гидравлических сопротивлениях. — М.: Энергия, 1978. — 305 с.
12. Пирсол И. Кавитация. — М.: Мир, 1975. — 95 с.
13. Reynolds O. The causes of racing of the engines of screw steamers, investigated theoretically and by the experiment // Tr. Inst. Naval Arch. — 1873. — Vol.14. — Sc.1. — p.56-57.
14. Смородов Е.А., Галиахметов Р.Н., Ильгамов М.А. Физика и химия кавитации. — М.: Наука, 2008. — 228 с.
15. Franc Jean-Pierre, Michel Jean-Marie Fundamentals of cavitation. — Kluwer Academic Publishers, 2005. — 321 p.
16. Галин Л. А., Шальнев К. К. Прогнозирование щелевой // Труды акустического института. — 1969. — Вып. VII. — С.70-75.
17. Пылаев Н. И., Эдель Ю. У. Кавитация в гидротурбинах. — Машиностроение, 1974. — 250 с.
18. Knapp R. T., Daily J. W., Hammit F.G. Cavitation. — New York: McGraw-Hill, 1970. — 500 p.
19. Пат. 2123957 Российская федерация, МПК В63В59/08, В08В3/02. Способ подводной гидродинамической очистки корпусов судов и устройство для его осуществления / Макитрук А.А., Шильников С.Н., Жудин Ю.Г., Мухтаров Р.И., Клоков И.А., Кийко М.Ю. — № 98111015/28; Заявл. 18.06.1998; Оpubл. 27.12.1998.
20. Пат. 2001666 Российская Федерация, МПК В01F5/00. Гидродинамический кавитационный эмульгатор / Кузеев И.Р., Хафизов Ф.Ш., Хусниязов М.Х., Абызгильдин Ю.М., Дегтярев Н.С., Шуверов В.М. — № 4892602; Заявл. 22.10.1990; Оpubл. 30.10.1993.
21. Пат. 1394 Україна, МПК В01F 5/00. Кавітаційний змішувач / Козюк О.В., Литвиненко О.А., Кравець Б.К. — № 4842580/SU; Заявл. 25.04.1990; Оpubл. 25.03.1994. — Бюл. № 1. — 2 с.
22. Пат. 3961 Україна, МПК F24J 3/00. Кавітаційно-роторний теплогенератор / Фомінський Л.П. — № 2004042634; Заявл. 07.04.2004; Оpubл. 15.12.2004. — Бюл. № 12. — 7 с.
23. Пат. 40030 Україна, МПК В01F 11/00. Роторно-кавітаційний пристрій / Козаков В.М., Перадзе А.Т., Безруков О.М., Лелюк О.В. — № u200811488; Заявл. 24.09.2008; Оpubл. 25.03.2009. Бюл. № 6. — 5 с.
24. Пат. 92155 Україна, МПК F04C 2/00. Роторно-кавітаційний пристрій / Козаков В.М., Тернюк М.Е., Перадзе А.Т., Безруков О.Т., Лелюк О.В. — № a200703326; Заявл. 8.03.2007; Оpubл. 11.10.2010. Бюл. № 19. — 6 с.
25. Пат. 3872 Україна, МПК F02M 33/00. Гідрокавітаційний змішувач / Горяйнов О.В., Романюк О.Д., Владимиров В.М., Кісліцина І.В., Комаров В.А. — № 20040402756; Заявл. 15.04.2004; Оpubл. 15.12.2004. Бюл. № 12. — 9 с.
26. Пат. 5962 Україна, МПК F02M 33/00. Генератор кавітації / Романюк О.Д., Владимиров В.М., Горяйнов О.В., Зарнадзе М.К., Кісліцина І.В., Коваленко С.Г.; — № u200501005; Заявл. 04.02.2005; Оpubл. 15.03.2005. Бюл. № 3. — 13 с.
27. Пат. 64225 Україна, МПК F02M 33/00. Генератор кавітації / Романюк О.Д., Владимиров В.М., Овсянніков О.О. — № 2003043076; Заявл. 08.04.2003; Оpubл. 16.02.2004. Бюл. № 2. — 2 с.
28. Пат. 25775 Україна, МПК В01F 5/00. Кавітаційний пристрій для обробки води / Сілін Р.І., Гордєєв А.І., Гордєєв О.А., Третьюк В.В., Урбанюк Є.А. — № u200702555; Заявл. 12.03.2007; Оpubл. 27.08.2007. Бюл. № 13. — 2 с.
29. Бергман Л. Ультразвук и его применение в науке и технике: Пер. с нем. — М.: Издательский центр «ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР»», 1957. — 726 с.
30. Пат. 47865 Україна, МПК C02F 1/36, C02F 1/48, A61L 2/02. Пристрій для ультразвукової кавітаційної обробки рідинних середовищ у тонкому шарі в потоці / Луговський О.Ф., Мовчанюк А.В., Берник І.М. — № u200909432; Заявл. 14.09.2009; Оpubл. 25.02.2010. Бюл. № 4. — 3 с.
31. Пат. 188768 Российская Федерация, МПК В06В1/08, В01F3/00. Ультразвуковой диспергатор / Чермерис И.И., Короткоручко Н.И., Доновский-Янчук А.Г., Гончаренко Л.М., Барзилович П.П., СЕСО ОЛП. — № 188768; Заявл. 899636; Оpubл. 01.01.1966
32. Єрмолаєва А. В. Розробка технології очищення вовняного волокна з використанням електророзрядної нелінійної об'ємної кавітації: автореф. дис...канд. техн. наук: 05.18.19. — Херсон, 2009. — 22 с.

Надійшла до редакції 3.05.2012