

ВИЗНАЧЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ЗАСТОСУВАННЯ КАВІТАЦІЙНИХ УСТАНОВОК ДЛЯ ОЧИЩЕННЯ ПРОМИСЛОВИХ СТІЧНИХ ВОД

Іващенко Т.Г.¹, Зудіков А.О.², Зудіков О.Б.³

¹Державна екологічна Академія післядипломної освіти та управління
вул. Митрополита Липківського, 35, корп. 2, 03035, м. Київ

²Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»
пр. Дмитра Яворницького, 19, 49005, м. Дніпро

³ТОВ «ІнЕкоТех України»
вул. Смоленська, 72, 52001, м. Підгородне
ema.dea@ukr.net

Розглянуті особливості застосування кавітаційних установок для очищення стічних вод. Кавітація є ефективним методом, що дозволяє значно підвищити якість очищення води завдяки утворенню мікрочастинок, які руйнують забруднювачі. Досліджені різні типи кавітаційних установок, включаючи гідродинамічні та ультразвукові системи, та їх вплив на ефективність очищення.

Забруднення навколишнього середовища стічними водами є глобальною проблемою, що вимагає ефективних та екологічно чистих методів очищення. Традиційні методи очищення, такі як біологічне очищення та хімічна обробка, часто мають обмеження щодо ефективності, вартості та впливу на навколишнє середовище. Тому виникає потреба у розробці нових, більш ефективних та екологічно безпечних технологій очищення стічних вод. Кавітаційні технології, засновані на явищі утворення та колапсу кавітаційних бульбашок у рідині, демонструють високий потенціал для ефективного видалення органічних та неорганічних забруднювачів.

Основна увага приділена аналізу фізико-хімічних процесів, що відбуваються під час кавітації, показникам та їх впливу на різні типи забруднювачів, включаючи органічні та неорганічні сполуки. Проведено порівняння ефективності кавітаційного очищення з традиційними методами, такими як коагуляція, флотація та біологічне очищення.

Експериментальні дослідження показали, що кавітаційні установки можуть значно знизити концентрацію забруднювачів у стічних водах, зокрема важких металів, нафтопродуктів та органічних сполук. Виявлено, що оптимізація параметрів кавітації, таких як тиск, частота та інтенсивність, дозволяє досягти максимального ефекту очищення.

Результати дослідження свідчать про ефективність та перспективність застосування кавітаційних установок для очищення стічних вод, що може сприяти покращенню екологічної ситуації та зниженню негативного впливу промислових стічних вод та відходів на навколишнє середовище. *Ключові слова:* кавітація, очищення стічних вод, екологічно чисті технології, ефективність, економічна доцільність, параметри процесу, екологічна безпека.

Determining the features of the use of cavitation plants for industrial wastewater treatment. Ivashchenko T., Zudikov A., Zudikov O.

Environmental pollution by wastewater is a global problem that requires effective and environmentally friendly treatment methods. Traditional treatment methods, such as biological treatment and chemical processing, often have limitations in terms of efficiency, cost, and environmental impact. Therefore, there is a need to develop new, more efficient, and environmentally safe wastewater treatment technologies. Cavitation technologies, based on the phenomenon of the formation and collapse of cavitation bubbles in a liquid, show high potential for the effective removal of organic and inorganic pollutants.

This article examines the features of using cavitation installations for wastewater treatment. Cavitation is an effective method that significantly improves water treatment quality by generating micro-particles that destroy pollutants. Various types of cavitation installations, including hydrodynamic and ultrasonic systems, and their impact on treatment efficiency are investigated.

The main focus is on analyzing the physicochemical processes occurring during cavitation and their impact on different types of pollutants, including organic and inorganic compounds. The efficiency of cavitation treatment is compared with traditional methods such as coagulation, flotation, and biological treatment.

Experimental studies have shown that cavitation installations can significantly reduce the concentration of pollutants in wastewater, including heavy metals, petroleum products, and organic compounds. It has been found that optimizing cavitation parameters, such as pressure, frequency, and intensity, allows achieving maximum treatment efficiency.

The article also discusses the economic aspects of using cavitation installations, including installation and operating costs, as well as potential advantages compared to other treatment methods. Recommendations for the industrial-scale implementation of cavitation technologies and prospects for further research in this field are proposed.

The research results indicate the effectiveness and prospects of using cavitation installations for wastewater treatment, which can contribute to improving the environmental situation and reducing the negative impact of industrial waste on the environment. *Key words:* cavitation, wastewater treatment, environmentally friendly technologies, efficiency, economic feasibility, cavitation parameters.

Постановка проблеми. Забруднення довкілля промисловими стічними водами є глобальною проблемою, що вимагає ефективних та екологічно чистих методів очищення їх. Традиційні методи, такі як біологічне очищення та хімічна обробка, часто мають обмеження щодо ефективності, вартості та впливу на навколишнє середовище. Унаслідок деградації природних водних ресурсів зростає необхідність застосування високотехнологічних методів очищення води перед її використанням у промислових процесах. Недостатнє очищення стічних вод призводить до забруднення водойм, що викликає серйозні екологічні проблеми, такі як накопичення небезпечних речовин (свинцю, кадмію, хрому, тощо) у воді.

Внаслідок військових дій в Україні, багато енергооб'єктів і водозабірних систем зазнали руйнувань, що ускладнює процес очищення стічних вод. Процес потребує впровадження сучасних технологій і спеціальних очисних споруд, які здатні ефективно видаляти забруднюючі домішки. Нехтування проблемою очищення стічних вод може призвести до економічних втрат, пов'язаних із лікуванням захворювань, викликаних забрудненою водою, а також до зниження якості життя населення. Це особливо важливо в умовах, коли доступ до чистої води стає обмеженим.

Ці фактори підкреслюють, що очищення промислових стічних вод є не лише екологічною, але й соціальною та економічною проблемою, яка потребує термінового вирішення [1].

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Метою даного дослідження є встановлення основних закономірностей впливу параметрів кавітаційної обробки на процес очищення стічних вод та розробка рекомендацій щодо оптимізації цих параметрів для досягнення максимального ефекту очищення. Кавітаційні технології, засновані на явищі утворення та колапсу кавітаційних бульбашок у рідині, демонструють високий потенціал для ефективного видалення органічних та неорганічних забруднювачів. Дослідження спрямоване на визначення оптимальних умов експлуатації кавітаційних установок для мінімізації ризиків та підвищення ефективності процесу очищення стічних вод.

Важливим є те, що використання кавітаційних установок може зменшити потребу в хімічних реагентах, що позитивно впливає на екологічну безпеку.

Постійно розвиваються нові технології, які покращують ефективність кавітаційних установок, що робить їх ще більш привабливими для впровадження.

Вивчення сучасних досліджень та розробок в галузі кавітаційного очищення стічних вод. Огляд досліджень показує, що кавітаційні технології активно досліджуються та застосовуються для очищення стічних вод у різних галузях промисловості.

Кавітаційного пристрої використовуються для знезаражування, очищення стічних вод та осадів комунальних і промислових підприємств, тваринницьких комплексів, а також для зниження концентрації патогенних флори і фауни в рідких середовищах і розчинах, також можуть бути застосовані в очисних спорудах, в системах водопідготовки та для пастеризації рідких продуктів.

Дослідження показали, що кавітація ефективно руйнує органічні забруднення у стічних водах пивоварної промисловості, побутових стоках [7-9, 11]. Інші дослідження зосереджені на розробці кавітаційно-флотаційних процесів для очищення стічних вод, що дозволяє знизити витрати на обслуговування та підвищити ефективність очищення [2, 3, 5, 6]. Дослідження також показують, що параметри процесу, такі як температура, тиск та швидкість потоку, мають значний вплив на ефективність кавітаційного очищення [4, 10, 12, 13]. Наприклад, підвищення температури та тиску може збільшити ризик виникнення кавітації, тоді як збільшення швидкості потоку може сприяти зниженню цього ризику.

Таким чином, огляд літератури свідчить про важливість подальших досліджень у галузі кавітаційного очищення стічних вод та встановлення показників ризиків для забезпечення ефективної та безпечної експлуатації обладнання.

Методологічне або загальнонаукове значення: теоретичні основи кавітаційних процесів. Кавітація є фізичним явищем, що виникає в рідині при швидкому зниженні тиску, що призводить до утворення та подальшого руйнування бульбашок газу або пари. Це явище має і позитивні і негативні наслідки для обладнання [6].

Існує кілька типів кавітаційних установок, які використовуються для очищення стічних вод.

Гідродинамічні кавітаційні установки використовують швидке зниження тиску в рідині для утворення кавітаційних бульбашок. Ці установки часто використовуються для руйнування органічних забруднень та знезараження води (рис. 1, 2), наприклад гідродинамічний кавітаційний реактор КР-300 [14].

Ультразвукові кавітаційні установки використовують високочастотні звукові хвилі для утворення кавітаційних бульбашок, ефективні для видалення органічних та неорганічних забруднень, а також для знезараження води [15].

Кавітаційно-флотаційні установки поєднують процеси кавітації та флотації для ефективного видалення забруднень. Ці установки дозволяють знизити витрати на обслуговування та підвищити ефективність очищення [15].

Термодинамічні кавітаційні установки використовують термодинамічні ефекти для утворення кавітаційних бульбашок. Ці установки можуть бути ефективними для очищення води від специфічних забруднень, таких як важкі метали [15].

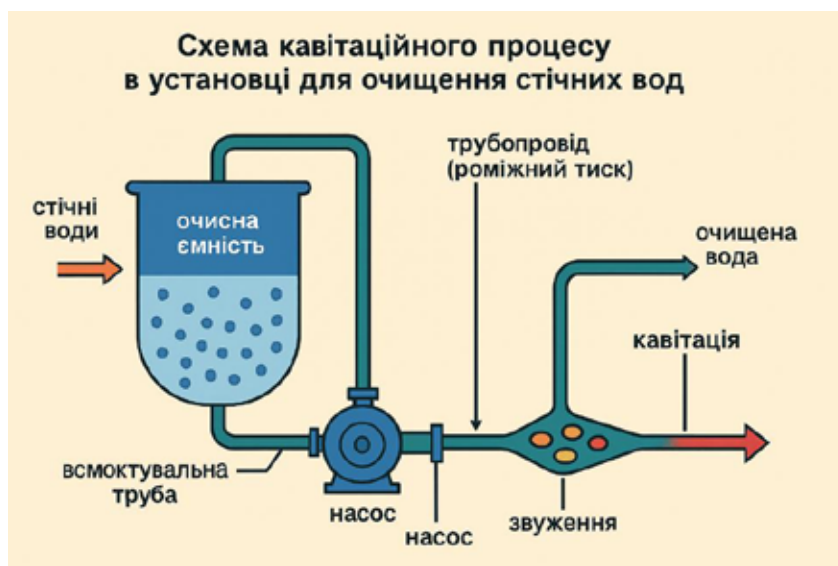


Рис. 1. Детальна схема кавітаційного процесу в установці для очищення стічних вод з позначками до елементів

1. Вода до очищення. Потік стічної води, яка надходить в систему для очищення.
2. Насос високого тиску. Насос, який забезпечує необхідний тиск для процесу кавітації.
3. Кавітаційна камера. Місце, де відбувається процес кавітації.
4. Очищена вода. Потік води після очищення, яка виходить із системи.

Основний компонент – **кавітаційна камера**, де відбувається процес кавітації. Вода проходить через цю камеру, де створюються бульбашки кавітації, які руйнують забруднення. Наприклад, кавітаційний реактор КР-300 (рис. 2) [14].

Основні принципи кавітації включають зниження тиску (кавітація виникає, коли тиск рідини знижується нижче її парціального тиску), утворення бульбашок (при зниженні тиску в рідині утворюються бульбашки, які можуть швидко зростати і зникати), вивільнення енергії (коли бульбашки колапсують, це призводить до вивільнення великої кількості енергії, що може викликати руйнування матеріалів) [7].

Знезаражувальний ефект кавітації в обладнанні КР-300 базується на процесах, що виникають у турбулентному русі рідини [14]. Під час кавітаційних течій у рідині генеруються інтенсивні гідродинамічні коливання, які зумовлені утворенням і зникненням кавітаційних бульбашок. Такі коливання сприяють фазовим переходам у мікрооб'ємах рідини, при цьому за мікросекундні проміжки часу температура локально може сягати кількох тисяч градусів, а тиск – підніматися до сотень атмосфер. Додатково, у процесі формування й руйнування кавітаційних бульбашок у малих газонаповнених порожнинах створюються умови для виникнення ультразвукових хвиль, електричних зарядів, а також електричних і магнітних полів. Унаслідок цього кавітаційно оброблена рідина зазнає одночасного термобаричного, ультразвукового та електромагнітного впливу. Для мікроорганізмів особливо небезпечним є поєднання механічного руйнування з електромагнітним впливом, оскільки індуковані електричні потенціали

можуть пробивати їхні клітинні оболонки та мембрани. Кавітація має кілька недоліків, які варто враховувати:

1. Пошкодження обладнання: кавітаційні бульбашки можуть створювати високі тиски та температури, що призводить до ерозії та пошкодження поверхонь обладнання.
2. Енерговитрати: процеси кавітації потребують значної кількості енергії, що може збільшувати витрати на експлуатацію.
3. Обмежена ефективність: кавітація може бути менш ефективною при високих концентраціях забруднень або при певних типах забруднень, таких як тверді частинки.
4. Шум: ультразвукові кавітаційні установки можуть створювати високий рівень шуму, що може бути неприємним для операторів та потребувати додаткових заходів для зниження шуму.

Кожен тип кавітаційних установок має відповідні переваги і недоліки, тому вибір конкретного типу залежить від характеру забруднень та умов експлуатації (табл. 1).

Гідродинамічні установки складаються з роторного реактора, системи подачі стічних вод, датчиків температури, тиску та швидкості потоку. Ультразвукові установки використовують високочастотні звукові хвилі для утворення кавітаційних бульбашок та включають ультразвуковий генератор, камеру для обробки води та датчики для контролю параметрів [16].

Розроблений пристрій (рис. 3) для знезараження та очищення стічних вод складається з елементів, розміщених на спільній несучій рамі. До його складу входять: подавальний або відвідний насос із привод-

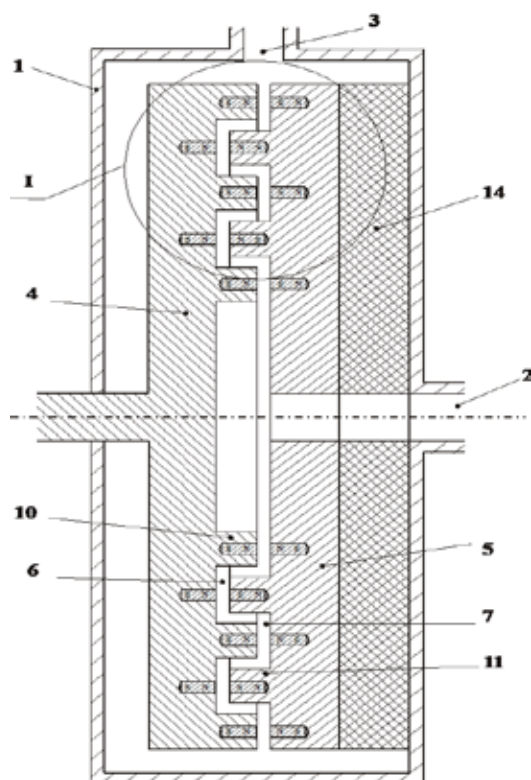


Рис. 2. Загальний вигляд пристрою для знезаражування та очищення стічних вод

1 – корпус; 2 – вхідний отвір; 3 – вихідний отвір; 4 – ротор; 5 – статор; 6 – кругові пази ротору; 7 – кругові пази статору; 8 – радіальна канавка ротору; 9 – радіальна канавка статору; 10 – виступи ротору; 11 – виступи на статорі; 12 – отвори для монтажу магнітів; 13 – магніти; 14 – ізолятор.

ним електродвигуном, пульт автоматичного керування та кавітаційний реактор, обладнаний власним електродвигуном. Реактор має корпус з вхідним та вихідним отворами для переміщення рідини. У середині корпусу розташовані ротор і статор у вигляді дисків, на яких виконані радіальні канавки, кругові пази й виступи, причому статор електрично ізолюваний від корпусу. У роторі та статорі також передбачені технологічні отвори, в які вмонтовано постійні магніти.

Особливістю обладнання є специфічне розташування магнітів у роторі та статорі: якщо в одній із цих парних частин (роторі або статорі) всі магніти орієнтовані однойменними полюсами в одному напрямку, то в іншій частині (відповідно, статорі або роторі) магніти розміщені з чергуванням – через один, чергуючи полюси однакової та протилежної полярності відносно полюсів магнітів першої частини. А також у вхідному отворі корпусу вмонтовані автоматичні електрохімічні датчики, в корпус пристрою вмонтовані вібродатчики, що фіксують показники вібрації у трьох площинах, що забезпечує підвищений рівень екологічної безпеки та знижує ризики. Всі датчики приєднані до пульта автоматичного регулювання, а в сам пульт автоматичного регулювання вмонтований програмно-апаратний комплекс із штучним інтелектом.

Знезаражування кавітаційним методом здійснюється за проточною схемою, тобто не потребує проміжних контактних посудин (резервуарів).

Кавітаційні процеси мають ряд фізико-хімічних властивостей, які впливають на їх ефективність це:

- температура (висока температура може зменшити в'язкість рідини, що сприяє кавітації);
- склад рідини (наявність домішок або газів може впливати на процеси кавітації);
- тиск (зміни тиску в системі можуть суттєво впливати на інтенсивність кавітаційних явищ) (табл. 2).

Для проведення експериментів з кавітаційного очищення стічних вод використовувалися статистичні дані з різних типів кавітаційних установок, включаючи гідродинамічні та ультразвукові системи, а також дані з авторської розробки – гідродинамічного кавітаційного реактору КР-300.

Залежність тиску та інтенсивності кавітації від часу дає розуміння та можливість контролю цього процесу в інженерних системах, таких як гідравлічні машини, гвинтові насоси тощо (рис. 4).

Саме зміна тиску з часом визначає утворення та колапс кавітаційних бульбашок. Чим швидше змінюється тиск, тим інтенсивніша кавітація. Це пов'язано з тим, що бульбашки не встигають повністю роз-

Таблиця 1

Порівняння різних типів кавітаційних установок для очищення стічних вод (розроблено автором)

Тип кавітаційної установки	Переваги	Недоліки	Основні параметри
Установки з гідродинамічною кавітацією	Висока ефективність при обробці органічних забруднень	Потрібна висока енергія для підтримки процесу	Потужність, температура, тиск
Установки з акустичною кавітацією	Низьке енергоспоживання, хороша для малих обсягів води	Обмежена ефективність при високих концентраціях забруднень	Частота, інтенсивність звуку
Установки з вакуумною кавітацією	Широке застосування в промисловості, висока ефективність	Високі вимоги до технологічного процесу	Тиск, швидкість потоку, температура



Рис. 3. Гідродинамічний кавітаційний реактор КР-300 [17]

Таблиця 2

Порівняння ефективності очищення стічних вод за різними параметрами (розроблено авторами)

Параметр	Гідродинамічна кавітація	Акустична кавітація	Вакуумна кавітація
рН води	6-8	5-9	6-9
Температура	40-80°C	20-60°C	30-70°C
Енергоспоживання	Високе	Низьке	Середнє
Час очищення	10-30 хвилин	5-15 хвилин	20-40 хвилин

ширитися або стиснутися, що призводить до більш енергійних колапсів.

Чим довше тиск залишається нижчим за тиск насичення, тим більше бульбашок може утворитися, що призводить до посилення кавітації.

Якщо зміна тиску має періодичний характер, то кавітація також буде періодичною, що може призвести до накопичення зносу на поверхнях.

Отже інтенсивність кавітації нелінійно залежить від тиску: вона максимальна в момент найменшого тиску, коли формуються та руйнуються бульбашки.

Методика проведення експериментів.

Експерименти проводилися в контрольованих умовах лабораторії для забезпечення точності вимірювань та повторюваності результатів. Умови експерименту включали зміну температури, тиску та швидкості потоку стічних вод для визначення їх впливу на процес кавітації. Температура варіювалася від 20°C до 60°C, тиск – від 1 до 3 бар, а швидкість потоку – від 1 до 5 м/с.

Для вимірювання показників технологічного процесу та екологічної безпеки використовувалися датчики температури, тиску та швидкості потоку, що були встановлені на вході та виході кавітаційного реактора. Дані з датчиків збиралися та оброблялися за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення, що дозволяло аналізувати залежності між

різними параметрами та оцінювати ризики виникнення кавітації.

Для обробки отриманих даних використовувалися статистичні методи, такі як описова статистика, регресійний аналіз та кореляційний аналіз.

Описова статистика дозволила визначити середні значення, стандартні відхилення та інші характеристики розподілу даних. Регресійний аналіз використовувався для встановлення математичних моделей залежностей між параметрами, а кореляційний аналіз – для визначення взаємозв'язків між показниками.

Дані оброблялися за допомогою програмного забезпечення, такого як Excel та спеціалізовані статистичні пакети, що дозволяли проводити комплексний аналіз та візуалізацію результатів у вигляді таблиць та графіків.

Це дозволило наочно продемонструвати залежності між параметрами та зробити висновки щодо оптимальних умов експлуатації кавітаційного обладнання.

Результати та обговорення. Кавітаційні технології демонструють високу ефективність у видаленні органічних та неорганічних забруднювачів зі стічних вод. Гідродинамічна кавітація, зокрема, є ефективним методом очищення, що дозволяє руйнувати бактерії та органічні речовини завдяки термічним, меха-

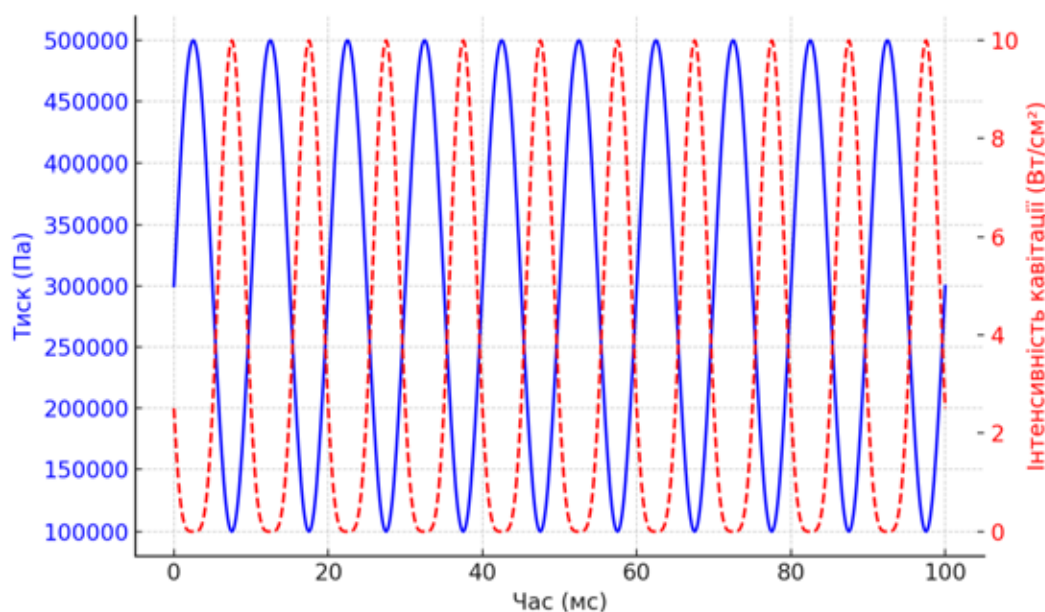


Рис. 4. Графік залежності тиску від інтенсивності кавітації та часу: синя крива – зміна тиску в кавітаційному реакторі (гармонічні коливання); червона штрихова крива – інтенсивність кавітації, яка різко зростає, коли тиск знижується

нічним та хімічним ефектам. Дослідження показали, що кавітаційні установки можуть значно знизити концентрацію важких металів, нафтопродуктів та органічних сполук у стічних водах.

Основні результати досліджень показують:

- Кавітація може знижувати концентрацію забруднюючих речовин, таких як феноли та інші токсини, на 70-90%.

- Процес очищення відбувається швидше в порівнянні з традиційними методами, такими як біологічне очищення.

- Використання кавітаційних установок може бути економічно вигідним, особливо в умовах високих рівнів забруднення (табл. 3).

У разі монолітної конструкції ротора і статора відсутня можливість змінювати (регулювати) вплив електромагнітного поля на оброблювану рідину. Це зумовлено тим, що спроба регулювання електромагнітного поля шляхом зміни швидкості обертання ротора призводить до ризику зникнення ефекту кавітації при певному зниженні обертів. Велика кількість магнітів в роторі і статорі (особливо при використанні потужних неодимових маг-

нітів), які були спряжені полюсами протилежного значення, створила таку велику силу тяжіння N між ротором і статором (нормальну до їх торцевих поверхонь), що повністю притягнула статор до ротора, таким чином виникла сила тертя покою між двома поверхнями до початку ковзання, вона визначається як добуток коефіцієнта тертя спокою і нормальної сили $F_r = \mu_s N$, при цьому коефіцієнт тертя μ_s був максимально оптимізований, потрібно було вирішувати яким чином зменшити значення сили тяжіння N без зменшення незаражувальної електромагнітної дії на рідину.

Підвищення температури та тиску збільшує інтенсивність кавітації, що сприяє більш ефективному руйнуванню забруднювачів, з іншого боку, збільшення швидкості потоку може знизити ризик виникнення кавітації та покращити ефективність очищення (табл. 4).

Зниження тиску нижче парціального тиску рідини є критично важливим для утворення кавітаційних бульбашок. Вища частота може призводити до більш інтенсивного утворення бульбашок, що покращує процес очищення. Використання різних

Таблиця 3

Аналіз економічної ефективності використання кавітаційних установок (розроблено автором)

Тип установки	Початкові витрати на установку	Витрати на енергію (кВт/год)	Економія в порівнянні з іншими методами
Гідродинамічна	Високі	Високі	Середня
Акустична	Середні	Низькі	Висока
Вакуумна	Високі	Середні	Середня

Таблиця 4

Вплив параметрів кавітації на ефективність очищення (розроблено автором)

Параметр	Значення	Ефективність очищення
Температура (°C)	20-60	Висока
Тиск (бар)	1-3	Висока
Швидкість потоку (м/с)	1-5	Середня

Таблиця 5

Порівняння ефективності різних методів очищення (розроблено автором)

Метод очищення	Ефективність видалення органічних забруднювачів	Ефективність видалення неорганічних забруднювачів
Кавітація	Висока	Висока
Коагуляція	Середня	Низька
Флотація	Середня	Середня
Біологічне очищення	Низька	Низька

газів (наприклад, азоту або гелію) може впливати на ефективність дезінфекції.

Крім того при використанні пристрою на очистних спорудах машинобудівних і гірничих підприємств, особливо де дуже часто змінюється склад забруднень, стає проблема оперативної зміни параметрів роботи пристрою (вибір обертів ротору, склад реагентів, що додають на вході до реактору, тощо).

Також важливим моментом є потреба швидкої зупинки пристрою в випадках виникнення динамічних навантажень в наслідок дисбалансів, що викликані зносом статора. Таким чином устаткування потребує дуже освіченого персоналу (велика собівартість роботи), присутній великий ризик виходу із ладу пристрою з людського фактору.

Крім того, кавітаційні установки можуть бути використані в комбінації з іншими методами, що дозволяє досягти синергетичного ефекту та підвищити ефективність очищення (табл. 5).

Таким чином, кавітаційні технології є перспективним методом очищення стічних вод, що дозволяє досягти високої ефективності та знизити негативний вплив на навколишнє середовище

Висновки. Кавітаційні технології демонструють високу ефективність у видаленні органічних та неорганічних забруднювачів зі стічних вод. Гідродинамічна та ультразвукова кавітація дозволяють значно знизити концентрацію важких металів, нафтопродуктів та органічних сполук. Вони здатні знижувати концентрацію органічних забруднювачів, таких як феноли, на 70-90%.

Параметри кавітації, такі як температура, тиск та швидкість потоку, мають значний вплив на ефективність процесу очищення. Підвищення температури

та тиску збільшує інтенсивність кавітації, що сприяє більш ефективному руйнуванню забруднювачів. Збільшення швидкості потоку може знизити ризик виникнення кавітації та покращити ефективність очищення.

Кавітаційні технології мають ряд переваг у порівнянні з традиційними методами очищення, такими як коагуляція, флотація та біологічне очищення. Вони дозволяють досягти високої ефективності очищення завдяки утворенню мікрочастинок, які руйнують забруднювачі, та можуть бути використані в комбінації з іншими методами для досягнення синергетичного ефекту.

Оптимізація параметрів кавітації, таких як тиск, частота та інтенсивність, дозволяє досягти максимального ефекту очищення. Це дозволяє мінімізувати ризики та підвищити ефективність процесу очищення стічних вод.

Кавітаційні установки мають потенційні економічні переваги у порівнянні з іншими методами очищення, включаючи зниження витрат на встановлення та експлуатацію. Вони можуть бути ефективно впроваджені у промислових масштабах.

Подальші дослідження у галузі кавітаційного очищення стічних вод можуть сприяти розробці нових методів та технологій, що дозволять ще більше знизити ризики та підвищити продуктивність обладнання.

В перспективі подальших досліджень є вивчення впливу кавітації на різні типи забруднювачів, розробка нових матеріалів для кавітаційних установок, збільшення масштабу кавітаційних технологій для промислового застосування та інтеграція кавітаційних технологій з іншими екологічно чистими методами очищення.

Література

1. Про схвалення Концепції Загальнодержавної цільової соціальної програми «Питна вода України» на 2022-2026 роки. Розпорядження Кабінету Міністрів України; Концепція від 28.04.2021 № 388-р.
2. Ободович О. М., Целень Б. Я., Сидоренко В. В., Степанова О. Є. (2023). Використання дискретно-імпульсного введення енергії для підготовки питної і технологічної води. Матеріали VII Міжнародної науково-практичної конференції «Чиста вода. Фундаментальні, прикладні та промислові аспекти» (9-10 листопада 2023 р., м. Київ, Україна). С. 123-126.
3. Авдєєва Л. Ю., Макаренко А. А. Ефективність використання сопел типу Вентурі при отриманні водних рослинних екстрактів. Наукові праці Національного університету харчових технологій. 2022. Т. 28, № 6. С. 64-72. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Npnukht_2022_28_6_8
4. Бернацька Н.Л. Зниження рівня забруднень дріжджевмісних стічних вод в умовах кавітації. Автореферат дисертації кандидата технічних наук. Національний університет «Львівська політехніка». Львів. 2017. 20 С.
5. Яхно, О. Вплив кавітаційних процесів на очищення річкової води гірських потоків / Яхно О.М., Гнатів І.Р., Гнатів Р.М. *Mechanics and Advanced Technologies*. 2022. No. 1. С. 62-69. <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2022.6.1.254613>
6. Знак З. О., Сухачський Ю. В., Мних Р. В. Розроблення кавітаційно-флотаційного процесу очищення стічних вод в аспекті реалізації сучасних концепцій синтезу хіміко-технологічних систем. Вісник Національного університету Львівська політехніка. Хімія, технологія речовин та їх застосування, 2014, 787. С. 75-79. URL: <https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2017/jun/3978/znak.pdf>
7. Вашкурак У. Ю. Використання кавітаційних технологій для очищення стічних вод пивоварні. Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Серія: Хімія, технологія речовин та їх застосування, 2017, 868. С. 267-272. URL: <https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2018/aug/14334/1709522p135-p140.pdf>
8. Особливості кавітаційної обробки молочної сироватки в присутності газів різної природи / Л. М. Предземірська, Л. І. Шевчук, В. Л. Старчевський. Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Львів : Львівська політехніка, 2012. № 726: Хімія, технологія речовин та їх застосування. С. 229-232.
9. Sewage Waste Water Treatment by the Hydrodynamic Cavitation Method, Chanchal Valvi, Dr. Pankaj Gohil, Dr. Hemangi Desai, *International Journal of Scientific Research & Engineering Trends* Volume 10, Issue 3, May-June-2024, ISSN (Online): 2395-566.
10. Hydrodynamic cavitation as an efficient water treatment method for various sewage: A review Yongxing Song, Ruijie Houa, Weibin Zhangb and Jingting Liuc, *Water Science & Technology*. Vol 86. No 2, 302 <https://doi.org/10.2166/wst.2022.201>
11. Kirill Fedorov, Elvana Cako, Kumaravel Dinesh, Reza Darvishi Cheshmeh Soltani, Zhaohui Wang, Javed Ali Khan, Grzegorz BoczkajCavitation-Based. Processes for Water and Wastewater Treatment. In: Nasr, M., Negm, A.M. (eds) *Cost-efficient Wastewater Treatment Technologies. The Handbook of Environmental Chemistry*, vol 118. Springer, Cham. PP. 331-377. https://doi.org/10.1007/978_2022_866
12. Mancuso, G., Langone, M. & Andreottola, G. A critical review of the current technologies in wastewater treatment plants by using hydrodynamic cavitation process: principles and applications. *J Environ Health Sci Engineer*18, 311–333 (2020). <https://doi.org/10.1007/s40201-020-00444-5>
13. Stepanova, O., Tselen, B., Sydorenko, V., Obodovych, O. (2023). WASTEWATER TREATMENT USING CAVITATION EFFECTS. *European Science*, 2(sge20-02), 35–42. <https://doi.org/10.30890/2709-2313.2023-20-02-014>
14. Пристрій для очищення і знезараження стічних вод: патент на корисну модель 158088 Україна. Зудіков А. В. Зудіков О. Б. МПК : C02F1/48 C02F1/34; № u 202230691.
15. Ультразвукові кавітаційні технології. Знезараження та фільтрування / О. Ф. Луговський, І. А. Гришко, А. І. Зілінський, А. В. Шульга, А. В. Мовчанюк, І. М. Берник. Вінниця : Видавець ФОП Кушнір Ю.В., 2022. 268 с.
16. T. Falyk, L. Shevchuk, I. Nykulyshyn, S. Melnyk. Research of the effects of various gases on cavitation-based removal of organic pollutants from distillery wastewater. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Ecology*. 3/10 (87) 2017. PP. 56-63. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.101708.
17. Зудіков А.О. Дослідження роботи дослідного зразка пересувного гідродинамічного кавітаційного реактора КР-300 згідно ТУ У 28.9-33360135-003:2017 на стадії освоєння виробництва. XIII Міжнародна науково-практична конференція «Вода для майбутнього: управління, збереження, інновації», присвячена Всесвітньому дню водних ресурсів 25-26 березня 2025 р., м. Київ / XIII International scientific and practical conference «Water for the future: management, conservation, innovation» dedicated to the World Water Day, March 25-26, 2025, Kyiv. С. 193-196. DOI: <https://doi.org/10.31073/mivg2025>.