

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Національному університеті “Львівська політехніка” Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник:** кандидат технічних наук, доцент  
**Шевчук Лілія Іванівна**,  
Національний університет “Львівська політехніка”,  
доцент кафедри технології органічних продуктів.

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Пляцук Леонід Дмитрович**,  
Сумський державний університет,  
завідувач кафедри прикладної екології;

кандидат технічних наук, доцент  
**Хохотва Олександр Петрович**,  
Національний технічний університет України  
“Київський політехнічний інститут”,  
доцент кафедри екології і технології рослинних полімерів.

Захист відбудеться “ 28 ” травня 2015 року о 14 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 20.052.05 при Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу за адресою:  
76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15.

З дисертацією можна ознайомитися у науково-технічній бібліотеці Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу за адресою:  
76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15.

Автореферат розісланий “ 27 ” квітня 2015 року.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради Д 20.052.05,

доктор геологічних наук, доцент



В.Р. Хомин



## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Очищення стічних вод являється надважливою екологічною проблемою народного господарства будь-якої країни, нехтування якою може призвести до значних негативних наслідків у вигляді екологічних катастроф національного масштабу. Саме тому її необхідно вирішувати якомога оперативніше, використовуючи новітні очисні технології, устаткування та методи очищення. Проблема очищення стічних вод є особливо актуальною для України, де через застосування морально застарілих технологій більшість стоків характеризуються високим рівнем хімічного і біологічного забруднення. І чи не основними джерелами забруднення довкілля тут постають підприємства харчової промисловості та переробки сільськогосподарської продукції. Переважна більшість таких стічних вод скидається неочищеними у природні водойми, на поля фільтрації чи в каналізацію, створюючи відчутне екологічне навантаження на довкілля.

Для зменшення шкідливого впливу стічних вод на навколишнє середовище особливої актуальності набуває удосконалення існуючих і впровадження нових перспективних технологій водоочислення із застосуванням високоефективних методів, здатних надійно очищати воду незалежно від ступеня її хімічного чи біологічного забруднення. Одним із перспективних шляхів вдосконалення очисних технологій є використання для інактивації контамінантної мікрофлори і очищення від органічних забруднень у водному середовищі кавітаційних явищ. Із огляду на відносну дешевизну, надійність та екологічну безпечність кавітаційне очищення води має безсумнівну перспективу закріпити свою визначальну роль в охороні водного басейну. Разом з тим, кавітаційні технології сьогодні ще не можна вважати досконалими. Вартість та ефективність процесу кавітаційного очищення стічних вод в значній мірі залежать від ступеня їх забрудненості, а також технологій і обладнання, які використовуються для їх обробки. Режими експлуатації кавітаційного устаткування для водоочисних технологій (робочий тиск, температура, швидкість потоку, хімічний склад і концентрація компонентів тощо) мають визначальний вплив на ефективність очисного процесу. Однак вони мало досліджені, потребують ґрунтовних лабораторних та виробничих випробувань, адаптації до конкретних виробничих умов. Це свідчить про актуальність теоретико-експериментальних досліджень, спрямованих на створення високопродуктивних і ефективних очисних технологій із використанням кавітаційних процесів та явищ і розробку втілюючого їх устаткування, що не тільки матиме широке застосування у промисловості, а й спроможне істотно підвищити екологічну безпеку виробництва завдяки пониженню кількості викидів шкідливих речовин у водне середовище.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота є складовою наукових досліджень кафедри технології органічних продуктів Інституту хімії та хімічних технологій Національного університету «Львівська політехніка»: "Дослідження кінетики і механізму процесів окиснення і співполімеризації органічних речовин з метою одержання нових речовин для обробки металів, волокнистих матеріалів. Застосування енергії акустичної кавітації для інтенсифікації окиснювальних процесів" (№ держреєстрації 0110U004691) та виконувалася згідно держбюджетної теми:

«Застосування віброкавітації для інтенсифікації хіміко-технологічних процесів» (№ держреєстрації 0113U001369), у рамках якої автор був виконавцем окремих розділів.

**Мета і завдання дослідження.** Метою дисертаційної роботи є розроблення заходів підвищення екологічної безпеки промислових виробництв шляхом створення основ кавітаційної технології очищення стічних вод від органічних і біологічних забруднень та устаткування для її реалізації.

Для досягнення поставленої мети необхідно було виконати наступні завдання:

- здійснити аналіз сучасного стану та виокремити основні джерела екологічної небезпеки доквіллю від діяльності широко розповсюджених підприємств переробки сільськогосподарської продукції та харчової промисловості;
- дослідити ефективність впливу кавітаційної обробки на динаміку процесу інактивації мікроорганізмів поверхневих водойм на прикладі бактерій роду *Sarcina*, *Bacillus*, *Diplococcus*, *Pseudomonas*;
- дослідити вплив барботування газів різної природи у кавітаційну зону обробки на показники якості очищення стічних вод із органічними та біологічними забрудненнями (на прикладі стоків молокозаводу та пивзаводу);
- встановити оптимальні технологічні параметри кавітаційної обробки стічних вод в атмосфері найбільш ефективного газу;
- створити математичні моделі процесів окиснення органічних домішок та знезараження води в кавітаційному полі;
- розробити технологію кавітаційного очищення природних та стічних вод від органічних та біологічних забруднень, провести її випробування з метою подальшого промислового використання.

**Об'єкт досліджень** – процес очищення стічних та поверхневих вод від органічних та біологічних забруднень.

**Предмет досліджень** – кавітаційне окиснення органічних речовин та знезараження стічних та природних вод в атмосфері різних газів.

**Методи досліджень.** Дослідження проводилися в лабораторних умовах на модельних розчинах та на водах реальних поверхневих водойм і стічних водах підприємств молочної та пивоварної промисловостей. В процесі досліджень було використано теоретичні та експериментальні методи. До теоретичних належать: порівняння методів очищення стічних вод, аналіз об'єктів досліджень, методи математичного моделювання та планування експериментальних досліджень, систематизація та узагальнення одержаних результатів. При виконанні досліджень були використані такі експериментальні методи: визначення сумарного вмісту органічних компонентів стічних вод за кількістю кисню, що витрачається на їх окиснення за показником хімічного споживання кисню (ХСК), визначення загальної кількості мікроорганізмів (МО) за показником загального мікробного числа (МЧ), мікроскопування фіксованих зразків МО, рН-метрія. Для оцінки експериментальних результатів були використані математичні методи обробки отриманих експериментальних даних.

**Наукова новизна одержаних результатів.** На основі проведених комплексних досліджень зі зменшення забруднення доквілля стічними водами, що вміщують органічні та біологічні шкідливі компоненти, розроблено основи технології кавітаційного

очищення стічних вод та реалізуючого її кавітаційного устаткування і отримано такі наукові результати:

- вперше експериментально встановлено, що ефективність кавітаційного очищення забруднених МО та органічними речовинами водних розчинів заложить від природи барботованого газу;
- вперше показано, що істотним способом інтенсифікації процесу кавітаційного очищення є барботування газу крізь озвучуване середовище, що забезпечує інактивацію монокультур у воді, зокрема: *Sarcina*, *Bacillus*, *Diplococcus*, *Pseudomonas*;
- вперше встановлено закономірності кавітаційного очищення стічних вод залежно від температури і тиску процесу, які дають змогу отримати оптимальні параметри обробки стоків молокозаводу та пивзаводу, і досягнути високого відповідно (99,78 % і 99,98 %) ступеня очищення стоків, що дозволить зменшити шкідливий вплив на довкілля при скиданні цих стоків;
- вперше виявлено синергізм дії віброкавітації та барботованого газу, що підтверджено розрахованими значеннями ефективних констант швидкості руйнування органічних сполук та знезараження води;
- вперше розроблено математичну модель процесу кавітаційного очищення стічних вод від органічних та біологічних забруднень, яка надає можливість оперативного регулювання параметрів очищення в залежності від якості води;
- отримала подальший розвиток технологія з застосуванням кавітації для очищення стічних вод за допомогою електромагнітного віброкавітатора резонансного типу, яка дає змогу підвищити енергоефективність очищення стоків та зменшити техногенне забруднення гідросфери.

**Практичне значення одержаних результатів.** На підставі результатів експериментальних досліджень, встановлено, що ефективним способом інтенсифікації процесу кавітаційного очищення забруднених органічними домішками та МО стічних вод є введення в оброблюване середовище азоту, що супроводжується стрімким збільшенням в рідині кількості зародків кавітації, і як наслідок, підвищенням інтенсивності кавітаційного поля та ефективності кавітаційної обробки.

На основі результатів проведених наукових досліджень запропоновано комплексну технологію очищення стічних вод харчових виробництв та оригінальну конструкцію віброкавітаційного пристрою для її реалізації. Виродження цієї технології дозволяє зменшити експлуатаційні затрати, збільшити продуктивність обробки води завдяки очищенню її в неперервному потоці у поєднанні із забезпеченням рівномірності обробки, що дозволить підвищити екологічну безпеку промислових підприємств. Дослідно-промислові випробування розробленого способу віброкавітаційного очищення були проведені на ТОВ «Кременецьке молоко» (Тернопільська обл., Кременецький р-н, с. Білокриниця), ТзОВ «Пивоварня «Кумпель» (Львівська обл., Пустомитівський р-н, с. Сокільники) та в лабораторії НАТ «Завод тонкого органічного синтезу «Барва» (м. Івано-Франківськ).

**Особистий внесок здобувача.** Полягає в аналізі вітчизняної і зарубіжної літератури щодо негативного впливу скидання неочищених стоків промисловими підприємствами на стан водних об'єктів України. Здобувачем особисто проведено експериментальні дослідження в лабораторії на модельних середовищах, поверхневих водах і на реальних

стоках; математично оброблено, проаналізовано та інтерпретовано експериментальні дані; проведено випробування результатів на пілотній установці; підготовлено матеріали досліджень до опублікування, апробовано результати роботи.

Основні ідеї, наукові положення і висновки дисертації сформульовані та обґрунтовані здобувачем особисто. На завершальному етапі дисертаційних досліджень постановка завдань та їх обговорення проводилися під керівництвом к.т.н., доцента Шевчук Л.І. У випадках співавторства з д.т.н., професором Старчевським В.Л., д.т.н., професором Афтаназівим І.С. основні положення досліджень та наукових праць базувалися на ідеях здобувача.

**Апробація результатів дисертації.** Результати досліджень, що викладені в дисертаційній роботі, доповідалися та обговорювалися на: V Всеросійській конференції студентів і аспірантів з міжнародною участю «Химия в современном мире», присвяченій 300-літтю з дня народження М. В. Ломоносова (м. Санкт-Петербург, Росія, 2011 р.); X, XI відкритих наукових конференціях професорсько-викладацького складу ІМФН (м. Львів, 2012 р., 2013 р.); 13th, 14th Meeting of the European society of sonochemistry (Lviv, Ukraine, 2012; Avignon, France, 2014); міжнародній науковій конференції «Актуальні проблеми хімії та технології органічних речовин» (APTOS), присвяченої 100-річчю від дня народження професора Дмитра Толопка (м. Львів, 2012 р.); міжнародній науково-технічній конференції “Компютерно-інтегровані технології у виробництві та освіті” (м. Луцьк, 2012 р.); Chemistry and Chemical Technology: Proceedings of the 3rd International Conference of Young Scientists (CCT-2013) (Lviv, Ukraine, 2013); V міжнародній конференції студентів, аспірантів та молодих вчених з хімії та хімічної технології (м. Київ, 2014 р.); III Міжнародному конгресі «Захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування» (м. Львів, 2014 р.).

**Публікації.** За матеріалами дисертації опубліковано 18 праць, у тому числі: 6 статей у фахових журналах, 2 з яких входять до міжнародних наукометричних баз даних, 10 тез доповідей на наукових конференціях, отримано 2 патенти України на корисну модель.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертаційна робота викладена на 200 сторінках друкованого тексту і складається зі вступу, 6 розділів, висновків, списку використаної літератури з 256 найменуваннями та 3 додатків. Основна частина дисертаційної роботи становить 158 сторінок і містить 27 таблиць та 63 рисунки.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність проблеми, яка вирішується у дисертаційній роботі, сформульовано мету, завдання, об'єкт і предмет досліджень, розкриті наукова новизна та практичне значення роботи. Наведено відомості про апробацію роботи та публікації, структуру та обсяг роботи, а також відмічено особистий внесок автора.

У **першому розділі** на основі аналізу патентної та науково-технічної літератури визначено основні напрямки досліджень. Розглянуто роботи провідних вітчизняних та зарубіжних науковців: Аграната Б.А., Адаменка О.М., Акоюяна Б.В., Бергмана Л., Веретільник Т.І., Вітенько Т.М., Гончарука В.В., Ельпінера І.Е., Занольського А.К., Кульського Л.А., Маргуліса М.А., Мейсона Т., Некоза О.І., Промтова М.А., Розенберга Л.Д., Рудька Г.І., Сасліка К., Семчука Я.М., Сіліна Р.І., Сиропока М.Г., Старчевського В.Л., Федоткіна І.М., Хмельова В.П., Яковлєва С.В. Розкрито актуальні

проблеми охорони гідросфери від техногенного забруднення, обумовленого підвищенням вмістом органічних та біологічних забруднень у стічних водах. Проаналізовано переваги та недоліки найпоширеніших методів очищення води, та серед них виділено як найбільш перспективний метод кавітаційного очищення води від органічних та біологічних забруднень. Розкрито поняття та механізм дії кавітації, показана доцільність застосування газів для інтенсифікації кавітаційного очищення води.

У *другому розділі* обгрунтовано напрямки досліджень та наведено характеристику об'єктів досліджень, викладено загальні методики проведення аналізів, описано схеми експериментальних кавітаційної та віброкавітаційної установок.

Об'єктами досліджень в даній роботі були:

- модельні середовища, штучно створені внесенням бактерій роду *Sarcina*, *Diplococcus*, *Bacillus*, *Pseudomonas*;
- модельні розчини, приготовані на основі молочної сироватки;
- поверхневі води з озер с. Завидовичі та с. Глишна-Наварія Львівської обл.;
- стічні води пивзаводу ТЗОВ «Пивоварня «Кумпель» (с. Сокільники, Пустомитівський р-н, Львівська обл.);
- промислові стоки молокозаводу ТОВ «Кременецьке молоко» (с. Білокриниця, Кременецький р-н, Тернопільська обл.).

Ультразвукові коливання частотою 22 кГц потужністю 91 Вт та інтенсивністю  $1,65 \text{ Вт/см}^3$  передавали за допомогою магнітострикційного випромінювача, зануреного в об'єм досліджуваної рідини ( $150 \text{ см}^3$ ). Для дослідження впливу віброкавітації на процес очищення води використовували вібраційний електромагнітний кавітатор, з можливістю змінювати частоту збудовачів кавітації в межах від 15 до 200 Гц, потужністю 800 Вт при об'ємі дискретно оброблюваної рідини  $1,5 \text{ дм}^3$ . Для інтенсифікації процесу кавітаційного очищення використовували гази, а саме: азот, повітря та гелій. Досліди проводили при температурі  $T = (293 - 323) \pm 1 \text{ К}$ , тиску  $P = (1 - 4) \cdot 10^5 \text{ Па}$ , тривалості  $\tau = 2 \text{ год}$ .

У *третьому розділі* наведено результати експериментальних досліджень впливу кавітаційної обробки в атмосфері азоту та повітря на знезараження води від бактерій різних родів: *Sarcina*, *Bacillus*, *Diplococcus*, *Pseudomonas*.

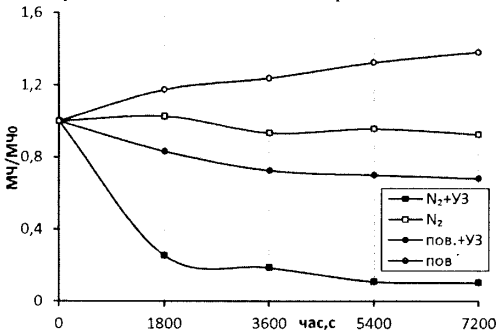


Рис. 1. Залежність відношення  $MЧ/MЧ_0$  (бактерії роду *Diplococcus*) від тривалості обробки за різних умов

Вихідні значення МЧ при обробці в атмосфері газів були різними, оскільки важко створити модельний розчин з однаковою кількістю МО. Тому для кращої наглядності експериментальних даних наведено відносний показник  $MЧ/MЧ_0$ . Бактерії роду *Diplococcus* належать до аеробних, тому подача самого лише повітря у модельний розчин зумовила нагромадження МО до  $MЧ_{\text{кін}} = 2210 \text{ КУО/см}^3$  ( $MЧ_{\text{поч}} = 1600 \text{ КУО/см}^3$ ) (рис. 1). А сумісна дія повітря та УЗ на модельне середовище привела до зменшення кількості мікробних клітин в 1,47 раз.

При барботуванні модельного розчину лише азотом спостерігали зменшення МО на 610 КУО/см<sup>3</sup>, а при сумісному впливі УЗ та азоту – на 7420 КУО/см<sup>3</sup> (МЧ<sub>пов.</sub>=8260 КУО/см<sup>3</sup>). УЗ-оброблення підсилює бактерицидну дію азоту, що й зумовило інтенсивний перебіг процесу очищення.

Сумарний вміст органічних речовин у досліджуваних об'єктах визначали за показником ХСК. Оскільки початкове значення ХСК у досліджуваних модельних розчинах при обробці в атмосфері повітря та азоту були різними (3200 і 5760 мг/дм<sup>3</sup> відповідно), тому для порівняння зміни вмісту органічних речовин протягом процесу обробки наведено залежність зміни співвідношення ХСК до ХСК<sub>0</sub>.

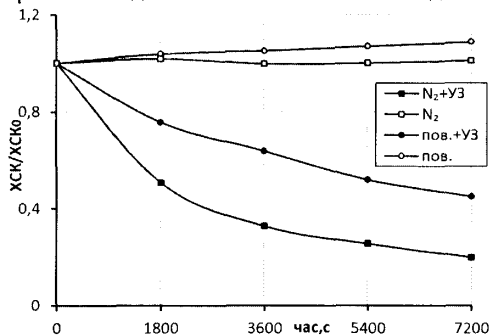


Рис. 2. Залежність відношення ХСК/ХСК<sub>0</sub> модельного розчину бактерій роду *Diplococcus* від часу обробки в атмосфері азоту і повітря

Очевидно, що більші за розмірами клітини легше піддаються руйнуванню, що підтверджується розрахованими ефективними константами швидкості інактивації МО. Встановлено, що спорогенні бактерії (*Bacillus*) є більш стійкими до впливу УЗ, ніж аспорогенні (*Diplococcus*, *Sarcina*, *Pseudomonas*).

Таблиця 1

Залежність ефективної константи швидкості інактивації МО від їх розмірів

Рід бактерій	<i>Diplococcus</i>	<i>Sarcina</i>	<i>Pseudomonas</i>	<i>Bacillus</i>
Розмір бактерій, мкм	0,5 ÷ 1	0,8 ÷ 3	0,5-0,8 ÷ 1,5-3	0,9-1,5 ÷ 3-5
УЗ/пов. $k \cdot 10^4$ , с <sup>-1</sup>	0,64	0,82	1,36	0,80

Встановлено, що криві зміни залежності МЧ та ХСК від часу спрямляються в напівлогарифмічних координатах. Це свідчить, що для опису даного процесу можна застосовувати кінетичне рівняння першого порядку. На основі отриманих експериментальних даних були розраховані ефективні константи швидкості інактивації МО та окиснення органічних сполук в досліджуваних зразках (табл. 2), значення яких залежать від родової приналежності МО, і свідчать про доцільність спільного застосування газу і УЗ. Експериментально встановлено відносні ряди ефективності впливу газів в кавітаційних умовах на процес інактивації різного роду бактерій: для азоту – *Diplococcus* > *Sarcina* > *Pseudomonas* > *Bacillus*; для повітря – *Pseudomonas* > *Sarcina* > *Bacillus* > *Diplococcus*. Також встановлено відносні ряди ефективності їх впливу в

умовах кавітації на окиснення органічних речовин модельних розчинів бактерій: для азоту – *Pseudomonas* > *Sarcina* > *Diplococcus* > *Bacillus*; для повітря – *Diplococcus* > *Pseudomonas* > *Sarcina* > *Bacillus*.

Таблиця 2

Зведена таблиця ефективних констант швидкостей інактивації МО та окиснення органічних речовин модельних розчинів в кавітаційних умовах

Рід бактерій	$k \cdot 10^4, c^{-1}$			
	Азот		Повітря	
	МЧ	ХСК	МЧ	ХСК
<i>Diplococcus</i>	3,81	2,50	0,64	1,17
<i>Sarcina</i>	3,33	2,68	0,82	0,88
<i>Pseudomonas</i>	1,69	2,85	1,36	0,92
<i>Bacillus</i>	1,43	1,87	0,80	0,82

Із наведених залежностей слідує, що при озвученні модельних середовищ в атмосфері азоту найкраще руйнувалися бактерії роду *Diplococcus*. А отже, при їх руйнуванні відбувалося найбільше вивільнення клітинного матеріалу, тому в кінцевому результаті очищення від органічних складових було більш тривалим. Протилежну закономірність встановлено для бактерій роду *Pseudomonas* – їх інактивація відбувалася найслабше, а очищення від органічних складових відбувалося найшвидше. Аналогічного результату досягнуто при озвучуванні модельного розчину на основі бактерій роду *Diplococcus* в атмосфері повітря. Єдина відмінність в цьому ряді спостерігається для спорогенних бактерій роду *Bacillus*, характер інактивації яких носить інший механізм.

Для подальших досліджень з метою наближення до реальних об'єктів, оскільки в природних водах завжди міститься комплекс МО, було обрано поверхневі водойми з різними вихідними параметрами, а саме: воду із озера с. Завидовичі (вода 1) ( $MЧ_{поч}=8000\sim50000$  КУО/см<sup>3</sup>) та із озера с. Глинна-Наварія (вода 2) ( $MЧ_{поч}=66000\sim170000$  КУО/см<sup>3</sup>). Знезараження поверхневих вод відбувалося в атмосфері азоту та повітря з використанням УЗ і без нього.

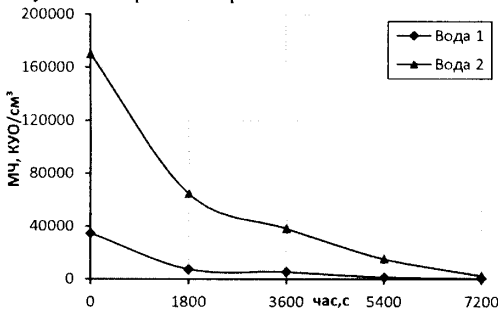


Рис. 3. Залежність МЧ природних вод від часу озвучення в атмосфері азоту

При дії УЗ і азоту на досліджувану воду 1 (рис. 3) спостерігали зменшення МО до  $MЧ_{кін}=560$  КУО/см<sup>3</sup> ( $MЧ_{поч}=34390$  КУО/см<sup>3</sup>). А озвучування води 2 в атмосфері азоту привело до  $MЧ_{кін}=2350$  КУО/см<sup>3</sup> ( $MЧ_{поч}=169600$  КУО/см<sup>3</sup>). Це свідчить про те, що застосування УЗ дозволяє отримувати однаково високий очисний ефект незалежно від початкового значення МЧ, що є дуже важливим при нестабільній кількості МО у вихідній воді.

При дослідженні впливу УЗ на процес очищення поверхневих вод виявлено, що значення ефективної константи швидкості знезараження води (табл. 3) залежить від природи барботованого газу.



Таблиця 3

Зведена таблиця ефективних констант швидкостей відмирання МО та окиснення органічних речовин і ступенів знезараження природних вод в умовах кавітації

Досліджуваний газ	Вода 1		Вода 2		Вода 1	Вода 2
	к · 10 <sup>4</sup> , с <sup>-1</sup>					
	МЧ	ХСК	МЧ	ХСК	Ступінь знезараження, %	
Азот	5,90	2,03	5,25	1,48	98,37	98,61
Повітря	3,08	1,49	1,50	0,55	84,89	70,30

Проведені дослідження дозволяють зробити висновок, що використання азоту в кавітаційних умовах є доцільним та ефективним методом інтенсифікації процесу очищення поверхневих водойм від біологічних забруднень.

У *четвертому розділі* описано результати експериментальних досліджень процесу кавітаційного очищення стічних вод пивоварної та молокопереробної промисловостей при барботуванні газів різної природи.

Очищення стічних вод «Пивоварні «Кумпель» з вихідними значеннями МЧ в діапазоні 100000-315000 КУО/см<sup>3</sup> та ХСК = 1312-2112 мг/дм<sup>3</sup> проводили за умов одноосібного барботування азоту, гелію, повітря та при їх спільній дії з УЗ.

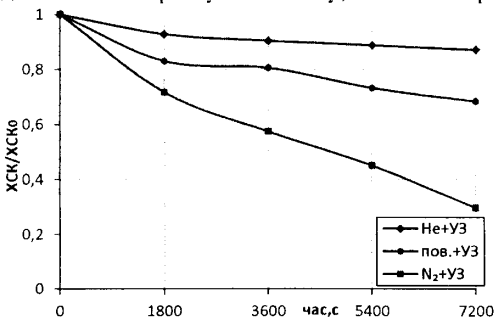


Рис. 4. Залежність ХСК/ХСК<sub>0</sub> стічної води пивоварні від часу озвучування

Найбільшого ступеня очищення від органічних речовин було досягнуто при використанні УЗ і азоту (рис. 4) – ХСК зменшилося до 800 мг/дм<sup>3</sup>, що в 2,64 рази менше порівняно з вихідним ХСК<sub>поч</sub>=2112 мг/дм<sup>3</sup>. Продування повітря в УЗ-полі приводить до зменшення ХСК в 1,46 разів відносно ХСК<sub>поч</sub>=1312 мг/дм<sup>3</sup>, а це в 1,71 раз краще, ніж при озвучуванні в атмосфері гелію (ХСК<sub>поч</sub>=1984 мг/дм<sup>3</sup>).

При порівнянні величин ефективних констант швидкості інактивації МО (табл. 4), встановлено, що для азоту в умовах кавітації її значення є найвище і становить –  $7,4 \cdot 10^{-4}$  с<sup>-1</sup>. Повітря та гелій мають практично однакові значення ефективних констант –  $4,41 \cdot 10^{-4}$  с<sup>-1</sup> і  $4,4 \cdot 10^{-4}$  с<sup>-1</sup>, однак вони в 2,22 рази вищі порівняно із самим лише УЗ –  $1,98 \cdot 10^{-4}$  с<sup>-1</sup>. Ефективна константа швидкості окиснення органічних речовин при дії азоту та УЗ є в 2,82 рази вище порівняно з повітрям, і в 7.32 рази вище порівняно з гелієм.

Таблиця 4

Зведена таблиця ефективних констант швидкостей відмирання МО та окиснення органічних речовин стоків пивоварні

Досліджуваний газ	МЧ, к · 10 <sup>4</sup> , с <sup>-1</sup>		ХСК, к · 10 <sup>4</sup> , с <sup>-1</sup>	
	з УЗ	без УЗ	з УЗ	без УЗ
Азот	7,40	0,35	1,61	0,21
Повітря	4,41	0,32	0,57	0,14
Гелій	4,40	0,25	0,22	0,03

Також встановлено, що ефективна константа швидкості очищення стоків при барботуванні азоту в УЗ-полі є більшою, ніж сума ефективних констант швидкості очищення при впливі цих чинників одноосібно:  $k_{(газ/УЗ)} > k_{(УЗ)} + k_{(газ)}$ . Це свідчить про синергізм дії УЗ і газу на очищення стоків як від біологічних ( $7,40 \cdot 10^{-4} \text{ c}^{-1} > 1,98 \cdot 10^{-4} \text{ c}^{-1} + 0,35 \cdot 10^{-4} \text{ c}^{-1}$ ), так і органічних забруднень ( $1,61 \cdot 10^{-4} \text{ c}^{-1} > 0,38 \cdot 10^{-4} \text{ c}^{-1} + 0,21 \cdot 10^{-4} \text{ c}^{-1}$ ).

Порівняльний аналіз показав, що в процесі очищення води найбільш ефективним є спільний вплив УЗ і газу, що дозволяє збільшити ступінь знезараження пивоварних стоків на (17,24-22,04 %), в залежності від природи присутнього газу, порівняно з самим УЗ.

Узагальненням результатів досліджень встановлено відносний ряд ефективності впливу природи газів на кавітаційне очищення стоків пивоварні:  $\text{N}_2 > \text{пов.} > \text{He}$ , що обумовлено різними фізичними параметрами використовуваного в УЗ-полі газу, а саме його розчинності, теплопровідності, відношення питомих теплоємностей тощо.

Подальші дослідження проводили на стічних водах молокозаводу ТОВ «Кременецьке молоко», в яких було ідентифіковано переважаючу кількість молочнокислих бактерій роду *Lactobacillus* і *Leuconostoc*. Для проведення дослідів використовували модельні розчини, приготовані з молочної сироватки, яка включає складові виробничих стічних вод молокозаводу. Початкове значення ХСК становило 10000-40000 м/дм<sup>3</sup> та МЧ в межах 70000-230000 КУО/см<sup>3</sup>.

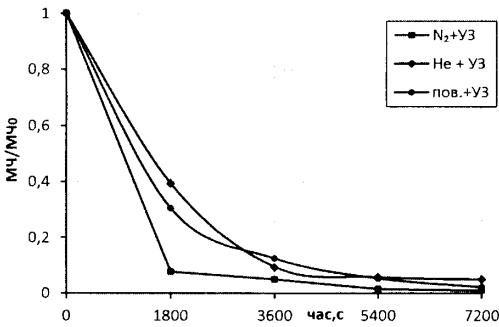


Рис. 5. Залежність відношення  $\text{МЧ}/\text{МЧ}_0$  молочної сироватки від часу озвучування

Дослідження впливу природи газу при кавітаційному очищенні проводили в атмосфері повітря, гелію та азоту, аналогічно, як і для стоків пивоварної промисловості. З рисунку 5 слідує, що найефективнішим виявилось застосування азоту в УЗ-полі – кількість МО зменшилася з  $\text{МЧ}_{\text{поч}}=231100$  КУО/см<sup>3</sup> до  $\text{МЧ}_{\text{кін}}=2200$  КУО/см<sup>3</sup>. Друге місце посідає використання повітря – в 47,17 разів порівняно з  $\text{МЧ}_{\text{поч}}=141500$  КУО/см<sup>3</sup>. Найменш ефективним виявилось застосування гелію в УЗ-полі – у 20,38 разів ( $\text{МЧ}_{\text{поч}}=42400$  КУО/см<sup>3</sup>).

Розраховані ефективні константи швидкості знезараження води (табл. 5), підтверджують вищу ефективність дії азоту на очищення модельного розчину порівняно з іншими газами в кавітаційних умовах.

Таблиця 5

Зведена таблиця ефективних констант швидкостей відмирання бактерій та окиснення органічних домішок модельного розчину

Досліджуваний газ	$\text{МЧ}, \text{k} \cdot 10^4, \text{c}^{-1}$		$\text{ХСК}, \text{k} \cdot 10^5, \text{c}^{-1}$	
	з УЗ	без УЗ	з УЗ	без УЗ
Азот	7,39	1,04	2,01	0,51
Повітря	5,50	0,41	0,78	-
Гелій	4,87	0,06	1,39	0,30

Встановлено синергізм дії УЗ і азоту:  $k_{(УЗ/газ)} > k_{(УЗ)} + k_{(газ)}$ , при очищенні, як від біологічних ( $7,39 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1} > 1,70 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1} + 1,04 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ ), так і органічних складових молочної сироватки ( $2,01 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1} > 0,75 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1} + 0,51 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ ).

Порівнюючи результати, одержані при дослідженні впливу природи газів на процес кавітаційного очищення стоків пивоварні і модельних розчинів, приготованих з молочної сироватки, встановлено точне співпадіння щодо ефективності дії  $\text{N}_2 > \text{пов.} > \text{He}$ , що підтверджується розрахованими ефективними константами швидкості інактивації МО (табл. 4 і 5).

У *п'ятому розділі* приведено результати досліджень впливу фізичних чинників на процес кавітаційного очищення стоків пивоварної та молочної промисловостей, наведено математичні моделі, розроблені на основі теорії планування повнофакторного експерименту, що адекватно описують та дозволяють прогнозувати процес кавітаційного очищення стічних вод.

Для визначення оптимальної температури процесу кавітаційного очищення стоків пивоварного виробництва було проведено серію дослідів в діапазоні температур 293-323 К в атмосфері азоту. Аналіз отриманих даних (табл. 6) свідчить про те, що з ростом температури збільшуються ефективні константи швидкості відмирання МО та деструкції органічних речовин стоків пивоварні. Очевидно зростання бактерицидної дії УЗ із зростанням температури підвищує ефективність кавітаційного процесу внаслідок зростання швидкості випаровування рідини і її парціального тиску всередині кавітаційної порожнини, що полегшує стадію її росту. Проте при температурі 313 К спостерігалася дещо нижча швидкість процесу знезараження порівняно із температурою 303 К. Очевидно подальше підвищення температури внаслідок різкого зростання парціального тиску рідини всередині кавітаційної порожнини утруднює стадію її заплескування, що знижує ефективність кавітації.

Таблиця 6

Залежність ефективних констант швидкостей відмирання МО та окиснення органічних складових стоків пивоварні від температури в умовах кавітації

№ з/п	Температура, К	$k \cdot 10^4, \text{ с}^{-1}$	
		МЧ	ХСК
1	293	7,40	1,61
2	303	8,45	2,13
3	313	8,11	2,36
4	323	10,95	2,72

Проведеними розрахунками встановлено, що в діапазоні температур 293-323 К із підвищенням температури швидкість термічного процесу деструкції органічних речовин зростає в 8,31 раз швидше, порівняно із звукохімічним. Тому при температурі, що вище 317 К нецільово проводити процес кавітаційного окиснення органічних домішок, оскільки при підвищених температурах відбувається вже термічна деструкція органічних речовин, а не внаслідок кавітаційних явищ.

Для дослідження закономірності впливу тиску на швидкість процесу очищення пивоварних стоків проведено серію дослідів в діапазоні надлишкового тиску  $0,5-3 \cdot 10^5$  Па при оптимальній температурі 303 К.

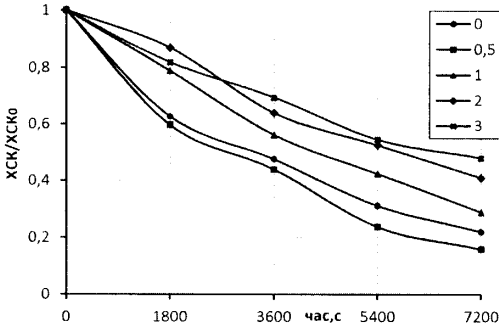


Рис. 6. Звукохімічна залежність  $XСК/XСК_0$  стоків пивоварні від часу при  $T=303K$  та різному надлишковому тиску

максимум, положення якого визначається ефективністю запускування кавітаційних бульбашок, а також те, що зміна ефективних констант швидкостей інактивації МО і деструкції органічних речовин стоків при збільшенні тиску мають подібну закономірність.

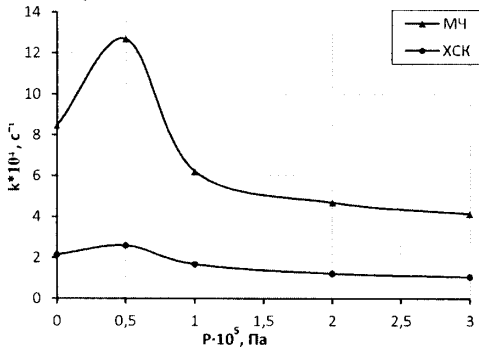


Рис. 7. Залежність ефективних констант швидкостей знезараження та окислення органічних речовин пивоварних стоків в атмосфері азоту від тиску при  $T=303 K$

тиску (до  $1 \cdot 10^5$  Па) призводить до різкого зростання порогу кавітації, оскільки різниця між звуковим тиском в негативній фазі і гідростатичним недостаття для розриву рідини. Порівнюючи одержані результати, встановлено, що оптимальним тиском проведення процесу кавітаційного очищення пивоварних стоків при температурі 303 K є надлишковий тиск  $0,5 \cdot 10^5$  Па.

З метою визначення впливу температури на швидкість кавітаційного очищення стоків молокозаводу було проведено серію дослідів в інтервалі температур 293-323 K в атмосфері азоту. Як свідчать результати проведених досліджень (табл. 7), при збільшенні температури від 293 K до 303 K зменшується ефективна константа швидкості

Після аналізу отриманих результатів експериментів встановлено, що при підвищенні тиску в системі з  $0,5 \cdot 10^5$  Па до  $3 \cdot 10^5$  Па ступінь знезараження стоків зменшується (з 99,98 % до 92,63 %). А при надлишковому тиску  $0,5 \cdot 10^5$  Па (рис. 6) досягається найвища ефективність процесу – XСК після двогодинного озвучення зменшилося в 6,33 рази ( $XСК_{\text{кн}}^{0,5}=288 \text{ мг/дм}^3$ ), а при тиску  $3 \cdot 10^5$  Па найнижча – в 2,09 рази ( $XСК_{\text{кн}}^3=928 \text{ мг/дм}^3$ ).

Як свідчать одержані дані (рис. 7), залежність швидкості звукохімічної реакції від тиску має чітко виражений

Характер кривих зміни швидкості процесу при підвищенні тиску вказує на наявність двох етапів. При збільшенні тиску до  $0,5 \cdot 10^5$  Па швидкість процесу різко зростає, ефективна константа швидкості знезараження стоків збільшилася в 1,5 разів і становила  $12,68 \cdot 10^{-4} \text{ c}^{-1}$ , а деструкції органічних речовин – в 1,21 раз ( $2,57 \cdot 10^{-4} \text{ c}^{-1}$ ). Підвищення ефективності кавітаційного очищення, зумовлено зменшенням часу запускування кавітаційної бульбашки внаслідок підвищення тиску в системі. На другому етапі спостерігалось різке зменшення швидкості процесу в обох випадках. На цьому етапі збільшення

зnezараження, а при подальшому її зростанні до 323 К – збільшується. Швидкість даного процесу характеризується двома складовими – швидкістю кавітаційного і термічного зnezараження. З цього слідує, що підвищення температури процесу сприяє підвищенню ефективності процесу внаслідок термічної деструкції бактеріальних клітин і зменшенню впливу кавітаційних ефектів.

Таблиця 7

Залежність ефективних констант швидкостей відмирання МО та окиснення органічних складових стоків молокозаводу від температури в умовах кавітації

№ з/п	Температура, К	МЧ, $k \cdot 10^4, c^{-1}$	ХСК, $k \cdot 10^5, c^{-1}$
1	293	7,39	2,01
2	303	6,88	2,10
3	313	8,12	2,26
4	323	9,28	2,58

Для визначення оптимальної температури звукохімічного очищення стоків молокозаводу, були розраховані ефективні константи швидкості окиснення органічних речовин як в УЗ-полі, так і в атмосфері самого лише азоту (рис. 8).

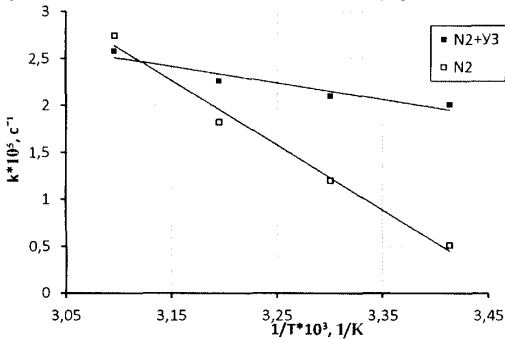


Рис. 8. Залежність ефективної константи швидкості окиснення органічних речовин стоків молокозаводу від температури при різних умовах експерименту

Подальшими дослідженнями було встановлено закономірності впливу тиску в діапазоні  $0,5 \cdot 10^5$  Па (надп.) на кавітаційне очищення стоків молокозаводу при температурі 313 К в атмосфері азоту.

Одержано (табл. 8) аналогічні екстремальні залежності ефективних констант швидкостей зnezараження і деструкції органічних речовин, які вказують, що максимальний ступінь очищення стоків в УЗ-полі при продуванні азоту досягнуто при тиску  $0,5 \cdot 10^5$  Па. У разі ж подальшого його підвищення до  $3 \cdot 10^5$  Па швидкість процесу різко зменшувалася, що пояснюється зміною співвідношення часу заплескування бульбашки і періоду коливаний, зменшенням радіусу кавітаційних бульбашок і зростанням порогу кавітації.

Згідно результатів встановлено оптимальні умови проведення процесу кавітаційного очищення стоків молокозаводу – температура 313 К і надлишковий тиск  $0,5 \cdot 10^5$  Па.

На основі одержаних результатів встановлено, що в діапазоні температур 293-323 К із підвищенням температури швидкість термічного процесу руйнування органічних речовин зростає в 5,37 разів, порівняно із звукохімічним – в 1,28 разів. Дослідженнями динаміки константи швидкості процесу звукохімічного очищення стоків молокозаводу залежно від температури встановлено, що вище температури  $T > 319$  К недоцільно проводити процес. Тому оптимальною температурою проведення процесу кавітаційного очищення стоків молокозаводу було обрано  $T = 313$  К.

Таблиця 8

Залежність ступеня знезараження води та ефективних констант швидкостей відмирання МО та окиснення органічних речовин стоків в атмосфері азоту від надлишкового тиску в кавітаційних умовах

№ з/п	P · 10 <sup>5</sup> (надл.), Па	k · 10 <sup>4</sup> , с <sup>-1</sup>		Ступінь знезараження, %
		МЧ	ХСК	
1	0	8,12	0,23	99,29
2	0,5	9,04	0,29	99,78
3	1	5,66	0,06	98,18
4	2	3,73	0,07	91,51
5	3	3,35	0,05	89,86

У *шостому розділі* проведено аналіз сучасного стану кавітаційного обладнання для обробки рідких середовищ у харчовій та суміжних промисловостях і виявлено, що наявні гідродинамічні кавітаційні пристрої через незначну інтенсивність формованого в них кавітаційного поля не забезпечують належної якості обробки, а ультразвукові кавітатори вкрай низькопродуктивні. На основі аналізу переваг і недоліків обрано напрям подальших досліджень, спрямованих на створення більш перспективних віброкавітаційних апаратів.

Узагальнення результатів експериментальних досліджень кінетики деструкції органічних та біологічних забруднень дало змогу запропонувати удосконалену технологію віброкавітаційного очищення стічних та поверхневих вод. Для її реалізації розроблено низькочастотний вібраційний електромагнітний кавітатор резонансної дії, який простий за своєю конструктивною будовою, енергоощадний і зручний у експлуатації та обслуговуванні.

Для дослідження віброкавітаційного впливу на процес очищення поверхневих вод з озера с. Глинка-Наварія, на якій попередньо досліджували вплив акустичної кавітації, була створена лабораторна віброкавітаційна установка. Виникнення віброкавітації було досягнуто при наступних параметрах: частота мережі живлення 50 Гц, амплітуда коливань збудовачів 1,5 мм, об'єм робочої камери 1,5 дм<sup>3</sup>, тривалість процесу – 2 год. Відповідно до результатів досліджень (табл. 9) застосування азоту у віброкавітаційних умовах дозволило підвищити ступінь знезараження на 10,31 %. При цьому ефективна константа швидкості знезараження зросла в 2,3 рази.

Таблиця 9

Зведена таблиця ступенів очищення і ефективних констант швидкостей відмирання МО та руйнування органічних речовин води у віброкавітаційних умовах

Умови процесу	k · 10 <sup>4</sup> , с <sup>-1</sup>		Ступінь очищення, %	
	МЧ	ХСК	МЧ	ХСК
вібро/N <sub>2</sub>	7,48	4,37	99,75	95,24
вібро	3,25	2,14	89,44	81,40

Введення азоту у віброкавітаційну зону дозволило також збільшити ступінь окиснення на 14,14 %, а ефективна константа швидкості руйнування органічних речовин зросла у 2,04 рази.

Отже, проведеними дослідженнями встановлено, що віброкавітаційна обробка є ефективним способом для очищення поверхневих вод, а барботування газу завдяки утворенню зародків кавітації інтенсифікує даний процес.

Також було проведено дослідження впливу віброрезонансної кавітаційної обробки на показники якості очищення стічних вод пивоварні і молокозаводу, на яких попередньо було досліджено вплив акустичної кавітації. На основі одержаних результатів, встановлено, що подача газу у віброкавітаційну зону підвищує ефективність очищення стоків більше, ніж на 17 % не залежно від їх хімічного складу (табл. 10). При цьому спостерігали високий ступінь очищення стічних вод молокозаводу від органічних забруднень за ХСК до 95,16 %, від біологічних забруднень до 99,62 %, та стоків пивзаводу до 97,22 % і 99,75 % відповідно.

Таблиця 10

Зведена таблиця ступенів очищення і ефективних констант швидкості деструкції органічних речовин стоків у віброкавітаційних умовах

Об'єкти досліджень	Ступінь очищення, %		$k \cdot 10^4, c^{-1}$	
	вібро/N <sub>2</sub>	вібро	вібро/N <sub>2</sub>	вібро
Стоки пивоварні	97,22	79,71	4,69	2,17
Стоки молокозаводу	95,16	77,87	4,22	2,04

Також було встановлено синергізм дії віброкавітації в присутності азоту, що підтверджено розрахованими значеннями ефективних констант швидкості руйнування органічних речовин:  $k_{(вібро/газ)} > k_{(вібро)} + k_{(газ)}$ , як для стоків пивзаводу –  $(4,69 \cdot 10^{-4} c^{-1} > 2,17 \cdot 10^{-4} c^{-1} + 0,84 \cdot 10^{-4} c^{-1})$ , так і молокозаводу –  $(4,22 \cdot 10^{-4} c^{-1} > 2,04 \cdot 10^{-4} c^{-1} + 0,51 \cdot 10^{-5} c^{-1})$ . Наведені експериментальні дані показали доцільність використання віброкавітації в присутності азоту для інтенсифікації очищення стічних вод промислових підприємств. Такий комплексний підхід забезпечує більшу ефективність процесу в цілому та відкриває перспективу практичного застосування віброкавітації в технологіях очищення стічних вод харчових підприємств, що має велике значення для охорони довкілля та екології гідросфери.

В даній роботі було запропоновано технологію, засновану на використанні віброкавітаційних явищ. Для підвищення повноти видалення забруднень у систему вводиться газ, який у даному випадку відіграє роль додаткових центрів кавітації, що сприяють утворенню нових мікробульбашок, понижуючи міцність міжмолекулярних зв'язків води, що стає причиною мікронадривів її суцільності. При цьому зменшуються затрати енергії на формування в рідині парогазової фази, яка передусє самозародженню кавітації.

Для реалізації розробленого методу очищення стічних вод запропоновано технологічну схему, наведену на рисунку 9, що включає наступні основні стадії очищення: механічне, яке передбачає очищення від крупних домішок, важких мінеральних і диспергованих органічних домішок у апаратах 1-4. Після механічного очищення вода поступає в адсорбер 5 на короткочасну обробку з метою очищення води від колоній МО, для уникнення процесу дезагрегації, що в подальшому призводить до зростання кількості МО у воді. Другим етапом є фізико-хімічне очищення у вібраційному електромагнітному кавітаторі 8, де очищення відбувається в неперервному режимі при подачі в нього газу (азоту, як найбільш ефективного, що було встановлено

проведеними дослідженнями) для інтенсифікації кавітаційної обробки. Воду після віброкавітаційної обробки подають на доочищення в десорбер 9, де відбувається розділення очищеної води від поглинутих газів.

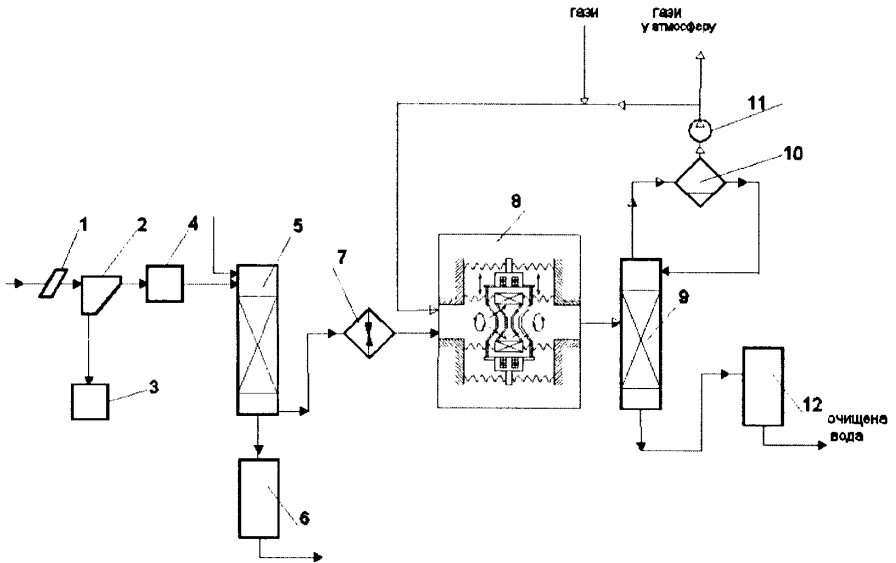


Рис. 9. Принципова технологічна схема комплексної кавітаційної технології очищення води:

1 – решітка, 2 – фільтр, 3 – піскова площадка, 4 – відстієник, 5 – адсорбер, 6 – смієць для води, 7 – теплообмінник, 8 – вібраційний електромагнітний кавітатор, 9 – десорбер, 10 – сепаратор, 11 – компресор, 12 – смієць для очищеної води.

Ключовим елементом очищення стічних вод у запропонованій схемі є кавітаційна система, до складу якої входить віброкавітатор. Основними перевагами вібраційного електромагнітного пристрою для збудження кавітації в рідинах є: висока продуктивність, придатність для обробки значних об'ємів рідин в неперервному їх потоці у поєднанні із забезпеченням рівномірності обробки рідин, простота реалізації та висока надійність обладнання, можливість регулювання інтенсивності та ефективності хімічних реакцій в робочій зоні кавітаторів, яка забезпечується подачею в зону оброблення газів.

Проведені економічні розрахунки впровадження даної технології показали, що собівартість очищення води становить 1,52 грн/м<sup>3</sup>, що підтверджує її економічну доцільність, та дозволяє підвищити ефективність очищення широкого спектру стічних вод і уникнути платежів (14,6 грн/м<sup>3</sup>) за скидання недостатньо очищених стоків.

У додатках наведено акти випробувань результатів кавітаційного та віброкавітаційного очищення стічних вод.



## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено важливе науково-практичне завдання – підвищення екологічної безпеки промислових підприємств шляхом створення основ кавітаційної технології очищення стічних вод. технічним рішенням якої є розроблення віброкавітаційного пристрою. Наукові і практичні результати дисертаційної роботи полягають у наступному:

1. Проведено аналіз сучасних досягнень стосовно вирішення проблеми техногенного забруднення довкілля стічними водами та розроблено основи кавітаційної технології очищення природних та стічних вод для зменшення кількості викидів органічних та біологічних забруднень у водне середовище.

2. Експериментально встановлено, що при барботуванні азоту в ультразвуковому полі досягаються різні ступені очищення води від бактерій роду *Diplococcus* (89,83 %), *Sarcina* (88,41 %), *Bacillus* (68,44 %), *Pseudomonas* (66,07 %), що зумовлено різними морфологічними ознаками досліджуваних мікроорганізмів (рід, форма, розміри, спорогенність). Встановлено відносні ряди ефективності впливу газів в кавітаційних умовах на знезараження води від бактерій різних родів, зокрема для азоту – *Diplococcus* > *Sarcina* > *Pseudomonas* > *Bacillus*, для повітря – *Pseudomonas* > *Sarcina* > *Bacillus* > *Diplococcus*, що свідчить про залежність кавітаційного впливу на процес інактивації мікроорганізмів від природи барботованого газу.

3. Експериментально підтверджено, що в атмосфері азоту при кавітаційному очищенні поверхневих вод з різними вихідними параметрами досягнуто високого ступеня очищення (98,37-98,61 %) незалежно від початкової кількості мікроорганізмів.

4. З'ясовано, що використання азоту в кавітаційних умовах приводить до інтенсифікації процесу очищення стічних вод і дозволяє збільшити ефективну константу швидкості процесу очищення води більш, ніж на порядок, що виражається в підвищенні ефективності очищення на 22,04 % – для пивоварних стоків та на 34,29 % – для стоків молокозаводу.

5. Встановлено відносний ряд ефективності впливу природи газу на процес кавітаційного очищення промислових стоків, при цьому спостерігали точне співпадіння щодо ефективності дії  $N_2 > пов. > Не$  як для стоків молокозаводу, так і пивоварних. Виявлено синергічний ефект сумісної дії ультразвуку і газу та віброкавітації і газу:

$$k_{(УЗ/газ)} > k_{(УЗ)} + k_{(газ)}; \quad k_{(вібро/газ)} > k_{(вібро)} + k_{(газ)}$$

6. Експериментально визначено оптимальні параметри процесу кавітаційного знезараження та окиснення органічних сполук у стічних водах, а саме  $T=313\text{ K}$  при  $P=0,5 \cdot 10^5\text{ Па}$  (надп.) для стоків молокозаводу та для пивоварних стоків –  $T=303\text{ K}$  при  $P=0,5 \cdot 10^5\text{ Па}$  (надп.), що дозволяє досягнути ступеня очищення стоків до 99,78% та 99,98% відповідно.

7. Розроблено математичні моделі, які описують і дають змогу прогнозувати біологічні процеси інактивації мікроорганізмів, окисні хімічні процеси, оптимізувати процес очищення стічних вод, проведена перевірка їх адекватності.

8. Розроблено дослідно-експериментальний взірць вібраційного електромагнітного кавітатора резонансної дії для очищення води при подачі азоту, який є ключовим елементом запропонованої технологічної схеми, яка забезпечує видалення біологічних забруднень за МЧ до 99,62-99,75 % та хімічних забруднень за ХСК до 95,16-97,22 % для стоків молокозаводу та пивзаводу відповідно. Виконано техніко-економічне

обґрунтування та розрахована еколого-економічна ефективність від впровадження запропонованої технології кавітаційного очищення стоків.

Результати дисертаційної роботи, а також основи технології кавітаційного очищення стічних вод випробувано на об'єктах ТзОВ «Пивоварня «Кумпель» (с. Соколівники), ТОВ «Кременецьке молоко» (с. Білокриниця) та в лабораторії ПАТ «Завод тонкого органічного синтезу «Барва» (м. Івано-Франківськ).

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. **Предзимірска Л. М.** Особливості кавітаційної обробки молочної сироватки в присутності газів різної природи / **Л. М. Предзимірска**, Л. І. Шевчук, В. Л. Старчевський // Вісник Нац. ун-ту «Львів. політехніка». Хімія, технологія речовин та їх застосування : зб. наук. пр. / відп. ред. Й. Й. Ятчишин. – Львів : Вид-во Нац. ун-ту «Львів. політехніка», 2012. – № 726. – С. 229-232. *(Розроблення методології та проведення досліджень, їх аналіз та узагальнення).*
2. **Предзимірска Л. М.** Ефективність кавітаційної обробки стоків спиртового виробництва в присутності газів різної природи / **Л. М. Предзимірска**, Л. І. Шевчук, В. Л. Старчевський, Н. С. Леочко // Економіка, планування і управління в лісовиробничому комплексі зб. наук.-тех. пр. ; Вісник Нац. лісотех. ун-ту Укр. – Львів : Вид-во Нац. лісотех. ун-ту Укр., 2012. – Випуск 22.11 – С. 125–129. *(Розроблення алгоритму проведення експериментальних досліджень, математичне узагальнення та аналіз отриманих результатів).*
3. Kondratovych O. Whey disinfection and its properties changed under ultrasonic treatment / O. Kondratovych, I. Koval, V. Kyslenko, L. Shevchuk, **L. Predzumirska**, N. Maksymiv // Chemistry & Chemical Technology. – 2013. – Vol. 7, No. 2. – P. 185–190. *(Виконання та узагальнення результатів експериментальних досліджень, наукове обґрунтування висновків, підготовка матеріалів до публікації).*
4. **Предзимірска Л. М.** Дезінфікуючий вплив ультразвуку на процес очищення стоків пивоварного виробництва / **Л. М. Предзимірска**, Шевчук Л. І., Кондратович О. З. // Вісник Нац. ун-ту «Львів. політехніка». Хімія, технологія речовин та їх застосування : зб. наук. пр. / відп. ред. Й. Й. Ятчишин. – Львів : Вид-во Нац. ун-ту «Львів. політехніка», 2013. – № 761. – С. 227–232. *(Проведення експериментальних досліджень їх аналіз та узагальнення).*
5. **Предзимірска Л. М.** Інактивація бактерій роду *Diplococcus* в атмосфері азоту і повітря / **Л. М. Предзимірска**, Л. І. Шевчук // Вісник Нац. ун-ту «Львів. політехніка». Хімія, технологія речовин та їх застосування : зб. наук. пр. / відп. ред. Й. Й. Ятчишин. – Львів : Вид-во Нац. ун-ту «Львів. політехніка», 2014. – № 787. – С. 292–297. *(Постановка проблеми, узагальнення результатів досліджень, підготовка матеріалів до публікації).*
6. Шевчук Л. І. Дослідження впливу азоту на ефективність процесу віброкавітаційної обробки стоків молокозаводу / Л. І. Шевчук, І. С. Афтаназів, О. І. Строган, **Л. М. Предзимірска** // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2014. – № 3/6 (69). – С. 43–47. *(Визначення ефективності процесу, узагальнення, наукове обґрунтування висновків).*
7. Пат. № 94005 Україна. МПК В06В 1/204. Вібраційний електромагнітний пристрій для збурення кавітації / Л. І. Шевчук, І. С. Афтаназів, О. І. Строган, **Л. М. Предзимірска** ; заявник і патентовласник Нац. ун-т «Львівська політехніка». –

№ 2014 04736; заявл. 05.05.14; опубл. 27.10.2014, Бюл. № 20. -- 4 с. *(Участь у експериментальних дослідженнях та їхнє узагальнення).*

8. Пат. № 94991 Україна, МПК В01J 19/00. Спосіб віброрезонансної кавітаційної очисної обробки рідини від біологічних забруднень / Л. І. Шевчук, В. Л. Старчевський, І. С. Афтаназів, О. І. Строган, **Л. М. Предзимірска**; заявник і патентовласник Нац. ун-т «Львівська політехніка». – № 2014 06230; заявл. 05.06.14; опубл. 10.12.2014, Бюл. № 23. – 2 с. *(Участь у експериментальних дослідженнях та наукове обґрунтування висновків).*

9. Іванишин С. І. Кінетика окислення дрожжей в водном розстворі глюкози под действием ультразвука / С. І. Іванишин, **Л. М. Предзимирская** // Сборник тезисов V Всероссийской конференции студентов и аспирантов. – Санкт-Петербург, 2011. – С. 554-555. *(Аналіз та узагальнення результатів експериментальних досліджень).*

10. Кондратович О. З. Очищення стічної води молочної промисловості під дією газів і ультразвуку / О. З. Кондратович, **Л. М. Предзимірска** // Десята відкрита наукова конференція ІМФП: Збірник матеріалів та програма конференції [«PSC-IMFS-10»], (17-18 травня 2012 р., м. Львів). Національний університет «Львівська політехніка». – Львів: Вид-во Нац. ун-ту «Львів. політехніка», 2012. – Ф.6. *(Проведення експериментальних досліджень їх аналіз та обговорення).*

11. Shevchuk L. Use of ultrasonic cavitation for purification of alcohols productions waste – waters in the atmosphere of different gases / L. Shevchuk, **L. Predzymirska**, I. Nykulyshyn, A. Rypka // Program and book of abstracts – 13th Meeting of the European Society of Sonochemistry (July 01–05). – Lviv, 2012. – P. 173. *(Виконання досліджень, підготовка матеріалів до публікації та обговорення результатів).*

12. Шевчук Л. І. Кавітаційний вплив природи газу на реакції окиснення домішок у стічних водах / Л. І. Шевчук, **Л. М. Предзимірска**, І. З. Коваль // Актуальні проблеми хімії та технології органічних речовин (APCTOS) : матеріали міжнародної наукової конференції, присвяченої 100-річчю від дня народження професора Дмитра Толопка (6–8 листопада 2012 р.). – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2012. – С. 20. *(Проведення експериментальних досліджень їх аналіз та обговорення результатів).*

13. **Предзимірска Л. М.** Інтенсифікація очищення стоків молочної промисловості в умовах акустичної кавітації / **Л. М. Предзимірска**, Л. І. Шевчук, В. Л. Старчевський, І. З. Коваль // Тези міжнародної науково-технічної конференції «Комп'ютерно-інтегровані технології у виробництві та освіті» (4-6 жовтня 2012 р., Україна, м. Луцьк). – Луцьк, 2012. – С. 57. *(Виконання експериментальних досліджень, їх обґрунтування та узагальнення).*

14. **Предзимірска Л. М.** Вплив ультразвуку на зміну величини хімічного споживання кисню пивоварних стоків / **Л. М. Предзимірска** // Одинадцята відкрита наукова конференція ІМФП: Збірник матеріалів та програма конференції [«PSC-IMFS-11»] (13–14 червня 2013 р., м. Львів). Національний університет «Львівська політехніка». – Львів: Вид-во Нац. ун-ту «Львів. політехніка», 2013. – С. 139. *(Проведення експериментальних дослідженнях та їхнє математичне узагальнення).*

15. **Predzymirska L.** Disinfection of water with ultrasound in the atmosphere of different gases / **L. Predzymirska**, L. Shevchuk // Chemistry and Chemical Technology: Proceedings of the 3rd International Conference of Young Scientists CCT-2013. – Lviv: Lviv Polytechnic Publishing House, 2013. – С. 36–37. *(Узагальнення результатів експериментальних досліджень, підготовка матеріалів до публікації та їх обговорення).*

16. **Предзимірска Л. М.** Використання газів різної природи для інтенсифікації кавітаційного очищення стічних вод молокопереробних підприємств / **Л. М. Предзимірска, Л. І. Шевчук** // Збірка тез доповідей V Міжнародної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених з хімії та хімічної технології (9-11 квітня 2014 р., м. Київ) / Київський політехнічний інститут. – Київ, 2014. – С. 192. (*Проведення експериментальних досліджень та їхнє обговорення й узагальнення*).

17. Shevchuk L. Application of ultrasound for water treatment in the atmosphere of different gases / L. Shevchuk, **L. Predzimirska** // Program and book of abstracts – 14th Meeting of the European Society of Sonochemistry (June, Avignon, France). – Avignon, 2014. – P. 183–184. (*Проведення експериментальних досліджень, підготовка матеріалів до публікації*).

18. **Предзимірска Л. М.** Визначення закономірностей впливу фізичних факторів на кавітаційне очищення стоків молокозаводу / **Л. М. Предзимірска, Л. І. Шевчук, І. З. Коваль** // Збірник тез доповідей третього Міжнародного конгресу «Захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування» (17-19 вересня, м. Львів). – Львів, 2014. – С. 120. (*Виконання, аналіз, узагальнення експериментальних досліджень та їх обговорення*).

## АНОТАЦІЯ

**Предзимірска Л. М. Кавітаційне очищення природних і стічних вод від органічних та біологічних забруднень. – Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 21.06.01 – екологічна безпека. – Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ, 2015.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню екологічної проблеми – підвищення ефективності очищення природних і стічних вод від органічних та біологічних забруднень шляхом застосування кавітаційних явиць для зменшення негативних впливів діяльності промислових об'єктів на навколишнє середовище.

На основі експериментальних досліджень встановлено інтенсифікуючу дію газу на процес кавітаційного знезараження води від бактерій різних родів – *Sarcina*, *Bacillus*, *Diplococcus*, *Pseudomonas* та деструкцію органічних речовин. Результати одержані на реальних поверхневих водах підтвердили ефективність спільної дії азоту та УЗ, що дозволило отримати високий ступінь очищення (98,47-98,61 %) завдяки синергічному впливу УЗ та азоту на забруднення, незалежно від початкової кількості мікроорганізмів.

Проведено експериментальні дослідження процесу кавітаційного очищення стічних вод пивзаводу та молокозаводу в присутності азоту, гелію та повітря, у ході яких розраховані ефективні константи швидкості знезараження та окиснення складових стічних вод та встановлені ступені очищення стоків за основними показниками (ХСК та МЧ), а також визначено оптимальні технологічні параметри процесу.

Розроблено математичні моделі, які описують і дають змогу прогнозувати біологічні процеси інактивації мікроорганізмів, хімічні процеси окиснення органічних речовин стічних вод в кавітаційних умовах. Запропоновано комплексну технологію віброкавітаційного очищення води, яка забезпечує високу ефективність процесу в цілому та відкриває перспективу практичного застосування в технологіях водоочищення, що має велике значення для охорони довкілля та екології гідросфери.

**Ключові слова:** стічні води, поверхневі води, кавітація, газ, мікроорганізми, знезараження, органічні речовини, температура, тиск.

## АННОТАЦИЯ

**Предзмирская Л. М. Кавитационная очистка поверхностных и сточных вод от органических и биологических загрязнений. – Рукопись.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 21.06.01 – экологическая безопасность. – Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, Ивано-Франковск, 2015.

Диссертационная работа посвящена решению экологической проблемы – повышению эффективности очистки природных и сточных вод от органических и биологических загрязнений путем применения кавитационных процессов для уменьшения негативных воздействий деятельности промышленных объектов на окружающую среду.

На основе экспериментальных исследований установлено интенсифицирующее действие газа на процесс кавитационного обеззараживания бактерий различных родов – *Sarcina*, *Bacillus*, *Diplococcus*, *Pseudomonas* и деструкцию органических веществ в сточных водах. Экспериментально установлено, что при барботировании азота в ультразвуковом поле достигаются разные степени обеззараживания воды от бактерий исследуемых родов, что обусловлено различными морфологическими признаками исследуемых микроорганизмов (род, форма, размеры, спорогенность) и установлен относительный ряд эффективности воздействия азота в кавитационных условиях на обеззараживание воды от бактерий рода *Diplococcus* > *Sarcina* > *Pseudomonas* > *Bacillus*, а также воздуха – *Pseudomonas* > *Sarcina* > *Bacillus* > *Diplococcus*. Это свидетельствует о зависимости кавитационного воздействия на инактивацию микроорганизмов от природы барботированного газа. Результаты, полученные на реальных поверхностных водах, подтвердили эффективность совместного действия газа и УЗ, что позволило получить одинаково высокую степень очистки (98,47-98,61 %) благодаря синергическому влиянию УЗ и азота на загрязнение независимо от исходного количества микроорганизмов.

Проведены экспериментальные исследования кавитационной очистки сточных вод пивзавода и молокозавода в присутствии азота, гелия и воздуха, в ходе которых рассчитаны эффективные константы обеззараживания и окисления составляющих сточных вод и установлены степени очистки стоков по основным показателям (ХПК и МЧ). Экспериментально подтверждено, что совместное использование газа и УЗ позволяет увеличить степень обеззараживания пивоваренных стоков на 17,24-22,04 %, в зависимости от природы присутствующего газа, по сравнению с воздействием только УЗ.

Определены оптимальные технологические параметры процесса кавитационной очистки сточных вод. Разработаны математические модели, которые описывают и позволяют прогнозировать биологические процессы инактивации микроорганизмов, химические процессы окисления органических веществ сточных вод в кавитационных условиях.

Рассмотрены основные конструкции кавитационных устройств и установлено, что используемые гидродинамические кавитационные устройства, из-за незначительной интенсивности формируемого в них кавитационного поля не обеспечивают надлежащего

качества обработки, а ультразвуковые кавитаторы – крайне низкопродуктивны и дорогостоящие. На основе анализа их преимуществ и недостатков избрано направление дальнейших исследований, направленных на создание более перспективных виброкавитационных аппаратов. Создан способ виброрезонансной кавитационной обработки жидкостей, основными преимуществами которого являются высокая производительность, пригодность для обработки значительных объемов жидкостей в непрерывном их потоке. Предложена комплексная технология виброкавитационной очистки поверхностных и сточных вод, ключевым элементом которой является разработанный вибрационный электромагнитный кавитатор резонансного действия, которая обеспечивает большую эффективность процесса в целом и открывает перспективу практического применения кавитационных процессов в технологиях водоочистки, что имеет большое значение для охраны окружающей среды и экологии гидросферы.

**Ключевые слова:** сточные воды, поверхностные воды, кавитация, газ, микроорганизмы, обеззараживание, органические вещества, температура, давление.

### ABSTRACT

**Predzymirska L. M. Cavitation purification of natural and waste waters from organic and biological contaminants. – The manuscript.**

Thesis for the Candidate's Degree of Technical Sciences in the specialty 21.06.01 – Ecological Safety. – Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, 2015.

The thesis is devoted to the solution of environmental problems – increasing the efficiency of natural and waste waters from organic and biological pollution through the use of cavitation to reduce the negative impacts of industrial activities on the environment.

Based on experimental studies found intensification effect on the process of gas cavitation disinfection of bacteria of different genus *Sarcina*, *Basillus*, *Diplococcus*, *Pseudomonas* and degradation of organic matter. The results obtained on real surface water confirmed the effectiveness of the joint action of gas and ultrasound, which allowed to receive the same high degree of purification (98.47-98.61 %) due to a synergistic impact ultrasound and nitrogen pollution, regardless of the initial value of NM.

Experimental study of cavitation sewage treatment brewery and dairy in the presence of nitrogen, helium and air, during which constant calculated effective disinfection and oxidation components of wastewater and sewage treatment rate set on the basic parameters (COD and NM) and the optimum process parameters.

The mathematical models describing and enable to predict biological processes inactivate microorganisms, chemical oxidation of organic matter in wastewater cavitation conditions. The complex of vibrocavitative cleaning technology of surface and waste water, ensuring greater efficiency of the whole process and offers the prospect of practical application in water purification technology, which is important for the environment and ecology of the hydrosphere.

**Key words:** wastewater, natural water, cavitation, gas, bacteria, disinfection, organic matter, temperature, pressure.

