

**Луговський О. Ф., Гришко І. А., Зілінський А. І.,
Шульга А. В., Мовчанюк А. В., Берник І. М.**

**УЛЬТРАЗВУКОВІ КАВІТАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ.
ЗНЕЗАРАЖЕННЯ ТА ФІЛЬТРУВАННЯ**

Монографія

Вінниця, 2022

УДК 621.647.23

Л83

*Рекомендовано Вченою радою
Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
(протокол № 3 від 14.02.2022 р.)*

Рецензенти:

Афтаназів І. С., д.т.н., проф., завідувач кафедри нарисної геометрії та інженерної графіки Інституту прикладної математики та фундаментальних наук Національного університету «Львівська політехніка».

Вітенько Т. М., д.т.н., проф., завідувач кафедри обладнання харчових технологій Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя.

Яхно О. М., д.т.н., проф., професор кафедри прикладної гідроаеромеханіки і мехатроніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

**Луговський О. Ф., Гришко І. А., Зілінський А. І., Шульга А. В.,
Мовчанюк А. В., Берник І. М.**

Л83 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.

ISBN 978-617-7735-51-5

Монографія присвячена вирішенню актуальної науково-технічної проблеми підвищення ефективності кавітаційної обробки рідких середовищ шляхом створення обладнання, що забезпечує введення в рідину ультразвукових коливань високої інтенсивності.

Рекомендується для науковців, фахівців, аспірантів та студентів вищих навчальних закладів.

УДК 621.647.23

© О.Ф. Луговський, , І. А. Гришко, А. І. Зілінський,
А. В. Шульга, А. В. Мовчанюк, І. М. Берник

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1. ТЕХНОЛОГІЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КАВІТАЦІЙНОГО ЗНЕЗАРАЖЕННЯ РІДИНИ	10
1.1. Застосування ультразвукової кавітації в технологічних процесах	10
1.1.1 Підвищення ефективності технологічних процесів в нафтохімічній промисловості за рахунок застосування ультразвукової кавітації	10
1.1.2 Підвищення ефективності технологічних процесів при виробництві бетону за рахунок застосування ультразвукової кавітації	11
1.1.3. Підвищення ефективності технологічних процесів при очищенні твердих і еластичних поверхонь за рахунок застосування ультразвукової кавітації	13
1.1.4. Підвищення ефективності технологічних процесів в харчовій промисловості за рахунок застосування ультразвукової кавітації	14
1.1.5. Сучасні способи знезараження рідких середовищ	16
1.1.6. Проблеми створення технологічного обладнання для ультразвукового кавітаційного знезараження рідких середовищ	30
1.2. Ультразвукове кавітаційне обладнання з концентрацією ультразвукової енергії	40
1.2.1. Схеми обладнання для кавітаційної обробки рідини в потоці високоінтенсивним ультразвуком	41
1.3. Аналітичне дослідження роботи ультразвукового трубчастого кавітатора з радіальною формою коливань	47

1.3.1.	Особливості виникнення кавітації в технологічному об'ємі ультразвукового трубчастого кавітатора з радіальною формою коливань	47
1.3.2.	Аналітичне дослідження роботи ультразвукового трубчастого кавітатора з урахуванням конструктивних особливостей	51
1.3.3.	Чисельне моделювання кавітаційної області в циліндричній камері	59
1.3.4.	Чисельне моделювання кавітаційної області в підвідних каналах кавітаційної камери	64
1.4.	Експериментальне дослідження роботи проточного кавітатора з високою інтенсивністю ультразвуку для обробки рідких середовищ	67
1.4.1.	Експериментальне дослідження роботи ультразвукового трубчастого кавітатора в режимі радіальних коливань	68
1.4.2.	Дослідження інтенсивності кавітаційних явищ усередині кавітатора методом ерозійних тестів	73
1.4.3.	Дослідження інтенсивності кавітаційних явищ усередині кавітатора акустичним методом	76
1.4.4.	Експериментальне дослідження розповсюдження ультразвукової кавітації вздовж підвідних трубопроводів	80
1.5	Лабораторно-промислова апробація розробленого проточного кавітатора з високою інтенсивністю ультразвуку для обробки рідких середовищ	86
1.5.1.	Ультразвукова кавітаційна інактивація мікроорганізмів у рідких середовищах	87

1.5.1.1.	Особливості будови мікроорганізмів, що заражають рідкі середовища	88
1.5.1.2.	Застосування розробленого кавітатора в технологічному процесі інактивації мікроорганізмів у виробничих стоках	91
1.5.1.3.	Застосування розробленого кавітатора в технологічному процесі дезінтеграції клітин мікроорганізмів	95
1.5.1.4.	Застосування розробленого кавітатора в технологічному процесі інактивації мікроорганізмів	96
1.5.1.5.	Підвищення ефективності процесу ультразвукової кавітації при інактивації мікроорганізмів	99
1.5.1.6.	Застосування ультразвукової кавітації для знезараження змашувально-охолоджуваної рідини	106

РОЗДІЛ 2. ТЕХНОЛОГІЯ ФІЛЬТРУВАННЯ РІДИНИ В УЛЬТРАЗВУКОВОМУ КАВІТАЦІЙНОМУ СЕРЕДОВИЩІ

2.1.	Сучасний стан проблеми фільтрування рідин	114
2.1.1.	Способи очищення рідин від механічних забруднень	116
2.1.1.1.	Гравітаційне осадження	117
2.1.1.2.	Очищення під дією відцентрових сил	117
2.1.1.3.	Фільтрування як спосіб очищення рідин	119
2.1.2.	Фільтрувальні перегородки	120
2.1.3.	Модель руху рідини через пористу перегородку	124

2.1.4.	Можливості регенерації фільтруючих перегородок	126
2.1.4.1.	Механічна регенерація	128
2.1.4.2.	Протиточна регенерація фільтрувальної перегородки	129
2.1.4.3.	Імпульсна протиточна регенерація	133
2.1.4.4.	Струменева регенерація	134
2.1.4.5.	Хімічна регенерація	136
2.1.4.6.	Вібраційна регенерація	138
2.1.4.7.	Електрогідравлічна регенерація	140
2.1.4.8.	Ультразвукова кавітаційна регенерація	142
2.1.5.	Застосування ультразвукових коливань в технології фільтрування рідини	145
2.2.	Моделювання процесу фільтрування рідини в ультразвуковому кавітаційному середовищі	154
2.2.1.	Математична модель процесу руху частинки забруднювача в умовах ультразвукової кавітації	155
2.2.2.	Моделювання ударної взаємодії частинки забруднювача з фільтроелементом при ультразвуковому кавітаційному фільтруванні	164
2.3	Розробка технічного рішення ультразвукового кавітаційного фільтра з ефектом самоочищення	178
2.4	Методика розрахунку циліндричної ультразвукової кавітаційної камери фільтра з ефектом самоочищення	182
2.5.	Експериментальне дослідження роботи ультразвукового кавітаційного фільтра з ефектом самоочищення	197

2.5.1.	Дослідження впливу параметрів процесу ультразвукової кавітації на відносну втрату об'єму конструкційних матеріалів на основі планування багатofакторного експерименту	198
2.5.1.1.	Обґрунтування методики моделювання	202
2.5.1.2.	Математична модель ультразвукового кавітаційного процесу	206
2.5.2.	Дослідження впливу статичного тиску на інтенсивність ультразвукової кавітації	213
2.5.3.	Дослідження впливу розташування фільтрувальної перегородки на стоячу хвилю	221
	ПІДСУМКИ.....	230
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	232

ВСТУП

Ефективність багатьох технологічних процесів, які використовують явище ультразвукової кавітації, залежить від рівня інтенсивності введених ультразвукових коливань. Відомо, що ультразвукові коливання інтенсивністю до 2 Вт/см^2 здатні, наприклад, стимулювати розмноження мікроорганізмів, коливання інтенсивністю $5\text{...}10 \text{ Вт/см}^2$ успішно використовуються в процесі руйнування твердих речовин, забруднень або іржі, коливання інтенсивністю $10\text{...}20 \text{ Вт/см}^2$ створюють інтенсивні мікротечії і тому використовуються в технологічних процесах, які пов'язані з видаленням жирових плівок, очищенням еластичних поверхонь, отриманням емульсій і тому подібне, коливання інтенсивністю понад 20 Вт/см^2 здатні інактивувати широкий спектр шкідливих і небезпечних для здоров'я людини мікроорганізмів.

У більшості існуючого ультразвукового технологічного кавітаційного обладнання промислового і медичного призначення успішно використовується ультразвук інтенсивністю до 10 Вт/см^2 . Ввести в рідину ультразвукові коливання такої інтенсивності вдається з мінімальними втратами енергії завдяки узгодженню випромінювача з рідинним навантаженням. Проте для деяких важливих технологічних процесів виникає необхідність створення ультразвукового кавітаційного технологічного обладнання з інтенсивністю ультразвукових коливань більше 20 Вт/см^2 . У такому разі в результаті непропорційного зростання втрат енергії ефективність обладнання різко зменшується. Викликано це тим, що при підвищенні амплітуди коливань на випромінюючій поверхні ультразвукового перетворювача утворюється екрануючий кавітаційний парогазовий прошарок, що поглинає і розсіює ультразвук. Це призводить до різкого зниження ефективності передачі ультразвукових коливань в

рідину і ерозійному руйнуванню випромінюючої поверхні. Проте тільки наявність подібного кавітаційного обладнання з високою інтенсивністю ультразвуку може забезпечити ефективність сучасної української важливої безреагентної технології знезараження та очищення рідин, яка здатна поліпшити екологічну безпеку багатьох промислових виробництв і поліпшити санітарно-епідеміологічні умови життєдіяльності людини.

Тому розробка технологічного кавітаційного обладнання з високою інтенсивністю ультразвуку є актуальною науковою проблемою, яка має широке практичне застосування.

Метою даної монографії є підвищення ефективності кавітаційної обробки рідких середовищ шляхом створення обладнання, що забезпечує введення в рідину ультразвукових коливань високої інтенсивності.

РОЗДІЛ 1. ТЕХНОЛОГІЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КАВІТАЦІЙНОГО ЗНЕЗАРАЖЕННЯ РІДИНИ

1.1. Застосування ультразвукової кавітації в технологічних процесах

Ультразвукова кавітаційна обробка рідких середовищ широко застосовується в різних галузях промисловості в технологічних процесах, пов'язаних з перемішуванням [1], диспергуванням рідких [2 – 6] і твердих речовин [7], отриманням прямих і зворотних емульсій [1, 5, 8, 9], розділенням рідких неоднорідних сумішей, центрифугуванням [10], флотацією [1, 11], фільтрацією [1, 12, 13]. Кавітаційний вплив дозволяє змінювати швидкість дифузії [14, 15], окислення [16, 17], кристалізації [18] і розчинення речовин, дозволяє активізувати хімічні реакції і багато інших фізичних процесів [14, 19], завдяки чому досягається інтенсифікація технологічних процесів.

1.1.1. Підвищення ефективності технологічних процесів в нафтохімічній промисловості за рахунок застосування ультразвукової кавітації

У нафтохімічній промисловості ультразвукова кавітаційна обробка завдяки руйнуванню вуглеводневих зв'язків дає можливість збільшити вихід світлих фракцій в процесі возгонки нафти [20, 21]. Кавітаційна обробка рідких палив приводить до того, що молекулярні ланцюги перетворюються в легкі вуглеводневі радикали газових, дистильованих паливних фракцій. Цей процес є ефективним безреагентним способом модифікації рідких палив [20].

При використанні ультразвукових кавітаторів в системах підготовки паливно-повітряної суміші для двигунів внутрішнього згорання,

можливо, поліпшити пускові характеристики за рахунок попереднього підігрівання робочої суміші, це важливо при експлуатації машин в екстремально холодних умовах. Окрім цього, оброблене паливо має поліпшені енергетичні характеристики за рахунок виникнення в ньому вільних радикалів, які покращують процес згорання паливної суміші [1].

У виробництві біопалив в процесі попередньої обробки часто застосовують ультразвукове кавітаційне обладнання, яке забезпечує якісне перемішування складених компонентів на молекулярному рівні й активно сприяє інтенсифікації хімічних процесів [22]. Традиційно технологічний процес виробництва біопалива для прискорення хімічних реакцій і масообміну передбачає підігрівання і механічне перемішування, на що витрачається значна частина енергії. Застосування ультразвукової кавітаційної обробки сприяє зменшенню енерговитрат при виробництві, а також здатне інактивувати мікроорганізми в оброблюваному середовищі. Наявність бактерійного забруднення призведе до погіршення якості і появи різкого гнильного запаху, що негативно позначається на експлуатаційних характеристиках.

Ця технологія потребує надійних і ефективних кавітаційних апаратів, які здатні ввести в рідину ультразвукову енергію великої інтенсивності, оскільки час обробки в потоці досить малий. При цьому, необхідно забезпечити простоту монтажу в існуючі технологічні лінії, не вносячи додаткового гідравлічного опору.

1.1.2. Підвищення ефективності технологічних процесів при виробництві бетону за рахунок застосування ультразвукової кавітації

Ультразвукова кавітація дозволяє отримати залізобетонні вироби з високими експлуатаційними властивостями для будівельних і морських

споруд. Міцність на стискання і розтягування готових виробів при цьому підвищується на 15...20% [23]. Ультразвуковій кавітаційній обробці при цьому піддається тільки цементний клей, який надалі змішується з іншими компонентами.

Механізм дії ультразвукової кавітації на цементний клей полягає в наступному:

- кавітаційне диспергування цементу;
- кавітаційна дегазація води, що призводить до ущільнення бетону;
- кавітаційне активування води з утворенням атомів і вільних радикалів;
- прискорення і збільшення повноти гідратації за рахунок збільшення контактної площі цементу, поліпшення умов змочуваності і звукокапілярного ефекту;
- перемішування на молекулярному рівні цементного клею з наповнювачами, наприклад, парафіном.

Ультразвукова кавітаційна технологія обробки цементу дозволяє:

- понизити гігроскопічність бетону;
- забезпечити значну економію цементу;
- за рахунок насичення цементного клею додатковими компонентами (наприклад, нанопорошком вольфраму) створити бетон з високою мірою радіаційної непроникності для об'єктів спеціального призначення і контейнерів для тривалого зберігання радіоактивних відходів.

Гігроскопічність бетону зменшується за рахунок додавання в цементний клей в процесі ультразвукової кавітації парафіну. Кавітаційна обробка дозволяє отримати високоякісну перемішану на молекулярному рівні стійку систему "парафін-вода" (парафінисту пасту). Пасту вводять у бетономішалку разом з іншими компонентами. При температурі біля

600С частки парафіну переходять у в'язко-текучий стан і заповнюють капіляри і пори бетону. При охолодженні бетону парафін повертається в первинний стан, надаючи бетону водостійкість. Об'ємна гідрофобізація бетону парафіном дозволяє зменшити водо поглинання на 40.50%, підвищити корозійну стійкість і довговічність в умовах дії рідких агресивних середовищ.

Ідея ультразвукової технології модифікації бетону відома давно, проте через відсутність ефективного і надійного ультразвукового кавітаційного технологічного обладнання, а також відпрацьованих технологічних режимів не вдалося добитися стабільності досягнутих показників.

1.1.3. Підвищення ефективності технологічних процесів при очищенні твердих і еластичних поверхонь за рахунок застосування ультразвукової кавітації

Ефект ультразвукової кавітації широко застосовується в технологічних процесах очищення твердих і еластичних поверхонь [24 – 28]. У процесі очищення ультразвукова кавітація забезпечує не лише видалення забруднень з поверхонь, але і робить згубний вплив на мікроорганізми.

При кавітаційному очищенні еластичних поверхонь дія на забруднення і живі мікроорганізми здійснюється за рахунок дії декількох механізмів [29]. При схлопуванні кавітаційної бульбашки в напівперіоді стиснення ультразвукової хвилі від бульбашки, у разі його віддаленого розташування від сусідніх бульбашок або від поверхні волокон тканини або мікроорганізму, розходяться в радіальному напрямі ударні хвилі, імпульсний тиск в яких може досягати 100 ГПа. Ці інтенсивні ударні хвилі руйнують отверділі забруднення і відривають їх від м'якших

волокон тканини. Якщо кавітаційна бульбашка схлопується поблизу сусідньої бульбашки, поблизу поверхні тканини або поблизу мікроорганізму, то з бульбашки, внаслідок радіальної неурівноваженості сил, у напрямку сусідньої поверхні виникає інтенсивний кумулятивний струмінь, що руйнує тверді поверхні забруднень і пробиває оболонки мікроорганізмів.

Пульсації бульбашок кавітацій й ударні хвилі породжують мікротечії у воді, які інтенсивно перемішують мийний розчин на молекулярному рівні, підвищуючи його ефективність, і розмивають м'які забруднення, наприклад, жирові плівки. Крім того, ці ударні хвилі за рахунок перепадів тисків між пучностями і вузлами ультразвукової хвилі механічно руйнують ниткоподібні мікроорганізми. Локальні температури при схлопуванні бульбашок можуть досягати 1000°C, що активізує хімічні процеси і також згубно впливає на різні мікроорганізми.

Для ефективного процесу очищення еластичних поверхонь, потрібні ультразвукові кавітатори, які здатні ввести в рідину ультразвукову хвилю високої інтенсивності при цьому, забезпечивши рівномірну обробку всього об'єму. Кавітаційні апарати, які існують, не дозволяють досягти бажаного результату.

1.1.4. Підвищення ефективності технологічних процесів в харчовій промисловості за рахунок застосування ультразвукової кавітації

Вплив ультразвукової кавітації на фізико-хімічні процеси в харчовій промисловості сприяє скороченню енерго- і ресурсозатрат на виробництво, дає можливість поліпшити якість готової продукції, а також продовжити терміни її зберігання [30 – 32]. Ультразвукова

кавітаційна обробка речовини може сприяти створенню якісно нових продуктів з новими властивостями. Наприклад, при виробництві молочної продукції велике значення має харчова цінність, яка значною мірою залежить від концентрації і розміру жирових кульок в одиниці об'єму готового продукту. При введенні в молоко потужних ультразвукових коливань вдається досягти зменшення розмірів жирових кульок шляхом дроблення більших. При цьому в оброблюваному середовищі утворюється однорідна жирова емульсія і, як наслідок, збільшується харчова цінність продукту. Ультразвукова обробка молочних продуктів дозволяє досягти ефекту холодної пастеризації, при якій хвороботворні мікроорганізми, які можуть знаходитися в молочному продукті, знищуються, а корисні речовини, що знаходяться в ньому зберігають свої властивості, що проблематично досягти традиційними способами пастеризації, за рахунок застосування високотемпературної пари, інфрачервоного випромінювання або кип'ятінням.

Ультразвукова кавітація використовується в технології екстрагування, наприклад, пектину з рослинних компонентів [33]. Завдяки застосуванню "холодного" способу екстрагування отримують якісно новий продукт, який має поліпшені характеристики [34]. Масштабне застосування ультразвукової кавітаційної технології в цьому процесі можливе тільки за наявності високоефективних пристроїв, над розробкою яких працюють багато наукових шкіл.

Усі вище перелічені кавітаційні технології показують доцільність застосування ультразвукової кавітації для поліпшення техніко-економічних показників. Проте для промислового застосування цих технологій потрібні ультразвукові кавітатори, які здатні ввести в рідину ультразвукову хвилю високої інтенсивності.

У зв'язку з важливістю проблеми екологічної безпеки і здоров'я

людини у багатьох з перерахованих технологічних процесів особлива увага приділена інактивації мікроорганізмів.

1.1.5. Сучасні способи знезараження рідких середовищ

Існуючі нині способи знезараження рідких середовищ можна розділити на чотири основні групи, які принципово відрізняються механізмом інактивації мікроорганізмів:

- хімічні, пов'язані із застосуванням сильних окисників. В якості окисників використовують хлор, діоксид хлору, гіпохлорит натрію, озон, марганцево-кислий калій, йод, бром, перекис водню [35, 36];
- термічні, такі, що реалізуються за рахунок кип'ятіння і заморожування [37, 38];
- метод насичення води іонами благородних і кольорових металів - срібла, міді та ін., що мають бактерицидну дію [39, 40];
- фізичні, такі, що реалізуються за допомогою ультрафіолетових променів, ультразвуку, радіоактивного випромінювання [34, 41].

Кожен з перерахованих методів має свої особливості дії на мікроорганізми, має переваги і недоліки.

Для створення високоефективного і оптимального за вартістю обладнання для стерилізації рідкого середовища, наприклад, води, необхідно розглянути особливості дії кожного з відомих способів на присутні у воді, мікроорганізми.

Хімічні способи знезараження рідких середовищ

Найбільш поширеним і ефективним способом знезараження, особливо великих об'ємів води, є хлорування і озонування [42].

Завдяки окислювальним властивостям і консервуючому ефекту післядії, що запобігають розмноженню у воді різних мікроорганізмів, хлор є практично універсальним засобом для обробки питної і стічних

вод (рис. 1.1).

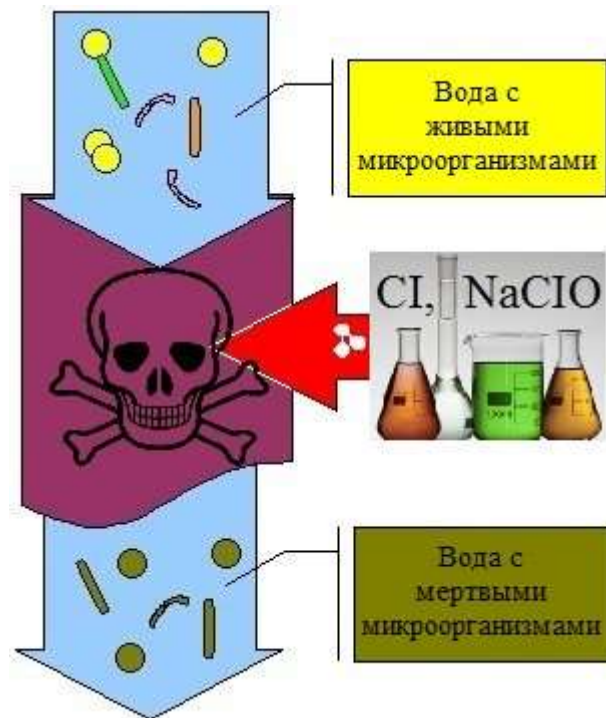


Рис. 1.1 – Схема знезараження рідких середовищ на основі хлору

Різновидами способу знезараження води шляхом хлорування є застосування гіпохлориту натрію NaClO , діоксиду хлору ClO_2 і хлораміну NH_2Cl [43, 44].

Хлорування води є надійним способом, який запобігає поширенню епідемій, оскільки більшість патогенних бактерій, наприклад, бацили черевного тифу, збудники дизентерії, вібріони холери, віруси енцефаліту дуже нестійкі по відношенню до хлору. Проте споротвірні бактерії і деякі віруси, наприклад, жовтяниці, хлор не знищує, що є одним з недоліків цього способу знезараження.

Багаторічний досвід використання хлору для знезараження води дозволив виявити окремі недоліки цього способу [45 – 48]:

- підвищені вимоги безпеки до очисних станцій, що використовують хлор для знезараження у зв'язку з тим, що хлор є сильно діючою отруйною речовиною;

- необхідність точного контролю дозування хлору. Недостатня кількість речовини не дасть необхідної бактерицидної дії, а зайва доза хлору приведе до погіршення смакових якостей води;

- значна залежність ефективності знезараження від хімічного складу води [47];

- необхідність забезпечення гарного змішування і достатньої тривалості контакту хлору з водою (не менше 30 хвилин);

- необхідність зберігання великого запасу хлору на станціях призводить до посилення заходів по захисту обслуговуючого персоналу від шкідливої дії хлору;

- необхідність видалення побічних продуктів процесу хлорування - галогеновмісних з'єднань (ГВС), велику частину яких складають тригалометани (ТГМ), хлорорганічні сполуки (ХОС), галогеновмісні з'єднання (ГВС) [48].

Хлор і побічні продукти хлорування в питній воді можуть представляти більшу небезпеку, ніж мікроорганізми, які ними знищуються [49]. Накопичення хлорвмісних з'єднань в організмі людини призводить до захворювань внутрішніх органів, а також атеросклерозу, раку, анемії і алергічних реакцій [50]. Хлор може руйнувати білки і робити несприятливий вплив на шкірний покрив і волосся, навіть малі концентрації хлорвмісних речовин впливатимуть негативно на організм людини, оскільки вони накопичуватимуться в різних тканинах. Утворення побічних хімічних сполук у воді є однією з головних причин пошуку нових технологій і засобів знезараження питної води.

Озонове знезараження води вважається найбільш екологічно чистим і універсальним способом її обробки (рис. 1.2.) [51 – 53].

Озонове знезараження води сприяє поліпшенню її смаку і запаху [54]. Дія озону на мікроорганізми полягає в окисленні органічних

речовин, що знаходяться у внутрішньоклітинній речовині. Активна форма озону здатна окислювати мінеральні з'єднання і хімічні речовини, що знаходяться в рідкому середовищі [55, 56]. Це дозволяє використати цю технологію в процесі очищення підземних вод, стічних вод підприємств, а також в системах кругового водопостачання басейнів великої продуктивності.



Рис. 1.2 – Схема знезараження рідкого середовища на основі озону

На відміну від хлорування, застосування озону в системах водопідготовки не викликає появу побічних шкідливих для людини хлорпохідних [57]. Утворення деяких хімічних сполук, що виникли в процесі озонування, навпаки сприяють посиленню процесу інактивації мікроорганізмів [58].

Висока окислювальна здатність озону накладає деякі обмеження на обладнання, з яким контактує рідке середовище, збагачене озоном. У процесі знезараження необхідно використати обладнання і матеріали, що

мають високу корозійну стійкість, це труби, реактори і місткості з ПВХ, нержавіючої сталі або бетону.

Озонування - хімічний спосіб знезараження і його ефективність значною мірою залежить від хімічного і фізичного складу води, а також технологічних параметрів процесу. Зміна температури рідини і її кислотності також призводить до погіршення динаміки процесу інактивації мікроорганізмів [59].

Виникнення в процесі озонування таких оксидів як пероксид, епоксид, формальдегід, ацетальдегід і так далі може негативно відобразитись на якості вихідного продукту. Окислені компоненти, що асимілюють, утворені в процесі знезараження озоном, є ідеальною їжею для мікроорганізмів. Це призводить до необхідності додаткового використання біологічно активних фільтрів [60].

Реалізація способу знезараження рідких середовищ шляхом озонування вимагає високих початкових витрат на обладнання і навчання обслуговуючого персоналу.

Високі початкові витрати на обладнання і необхідність кваліфікованого обслуговуючого персоналу значно обмежує повсюдне застосування цього способу знезараження. Швидке розкладання озону виключає ефект післядії, тому його застосування в якості кінцевого етапу очищення води у край сумнівно [61]. Введення в сильно забруднену органічними домішками рідину великої кількості озону спричиняє за собою утворення специфічного запаху і смаку.

Разом з хлоруванням й озонуванням в процесі знезараження води відоме застосування йодовмісних з'єднань (рис. 1.3). Як бактерицидний засіб йод застосовується давно, але в процесі водопідготовки найчастіше використовуються його з'єднання у зв'язку з низькою розчинністю чистого йоду [62].

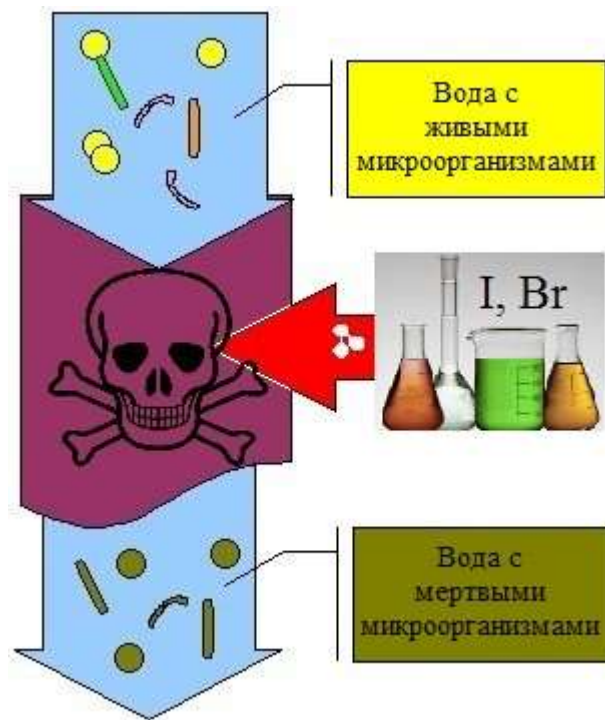


Рис. 1.3 – Схема знезараження рідкого середовища на основі йоду та броду

Найбільш активне йодовмісне з'єднання, яке застосовується в процесі знезараження води. Йод, на відміну від хлору, хімічно нейтральний до аміаку й інших хімічних реагентів. Найбільше поширення технологія йодування води отримала при інактивації мікроорганізмів в малих об'ємах [63]. Простота застосування цього способу дозволяє використати його для індивідуальної дезінфекції води в похідних умовах. Також йодування знайшло своє застосування при дезінфекції плавальних басейнів.

На ефективність і швидкість процесу знезараження при використанні хімічного реагенту йоду великий вплив має температура рідини, її кислотність, наявність у воді йодидів і гідрокарбонатів [64].

Вода, що пройшла обробку йодовмісними препаратами, може мати неприємний запах і специфічний смак, це пов'язано з утворенням речовини HOI, яка може вступати в реакцію з органічними

компонентами, утворюючи йодоорганіку [65].

До недоліків йодування, як і будь-якого іншого хімічного методу знезараження, варто віднести складність контролю концентрації реагенту під час процесу інактивації мікроорганізмів. Недостатня доза реагенту може не дати бактерицидного ефекту, а надлишок призвести до серйозних захворювань.

За частотою застосування в процесі знезараження разом з йодом знаходить своє застосування хімічний реагент бром (рис. 1.3). Принцип дії цієї речовини на мікроорганізми схожий з дією хлору, але, на відміну від нього, бром менш активний окисник.

До побічних продуктів при використанні технології бромовання слід віднести утворення бром-органічних з'єднань, які відносяться до сімейства діоксину, тобто сильних отрут [66]. Внаслідок цього після процесу знезараження необхідно здійснити видалення побічних продуктів.

Мале поширення технологій знезараження за допомогою йоду і броду пов'язане з високою вартістю реагентів порівняно з хлором, через що вони застосовуються в основному для дезінфекції рідини в малих об'ємах [67].

Термічні способи знезараження рідких середовищ

Для реалізації термічного способу знезараження рідких середовищ використовують високотемпературну плазму, відкрите полум'я, гаряче повітря, перегріту пару, а також низькі температури в процесі заморожування (рис. 1.4.) [68].

Найбільш простим термічним способом знезараження є кип'ятіння. Бактерицидний ефект цього способу досягається після декількох хвилин кип'ятіння рідини. При цьому у більшості мікроорганізмів відбуваються

безповоротні процеси, які призводять до їх загибелі [37]. До переваг кип'ятіння слід віднести незалежність результату інактивації від фізико-хімічного складу рідини, простота контролю процесу і можливість автоматизації.

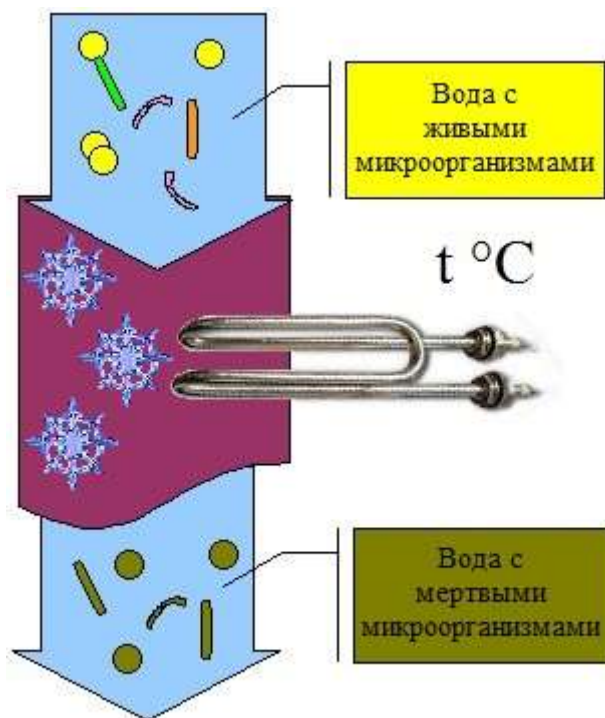


Рис. 1.4 – Схема знезараження рідких середовищ термічним способом

До недоліків цього способу знезараження насамперед необхідно віднести його велику вартість через значні витрати електроенергії або паливних матеріалів, а також малу продуктивність. При охолодженні внаслідок відсутності ефекту післядії оброблена рідина піддається повторному бактеріальному забрудненню через створення оптимальних умов для зростання і розмноження мікроорганізмів, що залишилися [69]. Кип'ятіння, як спосіб знезараження, доцільно застосовувати для побутового використання або в умовах епідемічної ситуації.

Заморожування, як спосіб знезараження, варто розглядати тільки умовно, оскільки низькі температури призводять тільки до послаблення

активного розмноження різних мікроорганізмів, але не до їх загибелі. При температурах, близьких до нуля, бактерії все ще зберігають здатність до розмноження, але інтенсивність при цьому значно знижується [38, 70]. Застосування низьких температур можна використати як спосіб продовження терміну зберігання початково чистої води.

Спосіб насичення рідких середовищ іонами благородних і кольорових металів

Особливу увагу при розгляді цього способу знезараження слід приділити застосуванню срібла і міді як найпоширеніших елементів, які застосовуються для інактивації мікроорганізмів (рис. 1.5) [71, 72].



Рис. 1.5 – Схема знезараження рідкого середовища способом насичення іонами срібла

Бактерицидна дія благородних і кольорових металів (міді і срібла) відбувається на молекулярному рівні. Їх частинки проникають у

внутрішньоклітинну речовину і взаємодіють з сірковмісними амінокислотами мікроорганізмів, які беруть участь в процесі фотосинтезу, внаслідок чого процес фотосинтезу стає неможливий і клітина відмирає [73].

Знезараження води шляхом насичення іонами срібла має ефект післядії [40]. Це дає можливість використати цю технологію для тривалого зберігання питної води.

Антимікробна дія срібла, як і будь-якого реагентного способу знезараження, значною мірою залежить від фізико-хімічного складу води [74]. У зв'язку з цим необхідно постійно здійснювати контроль дозування реагенту і контролювати якість вихідного продукту. Бактерицидний ефект срібла можливий при концентраціях реагенту 0,125 мг/л, що значно більше допустимих норм [75]. При менших значеннях можливо тільки стримувати розмноження мікроорганізмів. Срібло, яке застосовується для інактивації мікроорганізмів, дорогий реагент. Крім того, воно здатне накопичуватися в організмі людини, тим самим сприяти розвитку захворювання під назвою аргіроз – отруєння сріблом [76]. При багаторічному вживанні "срібної" води можливі запалення слизової оболонки шлунково-кишкового тракту, прояву ниркової недостатності, можуть виникати атаксія, параліч дихальних шляхів і так далі [77].

У процесі знезараження рідких середовищ своє застосування знайшли іони міді. Принцип дії їх на мікроорганізми схожий з дією срібла, але для цілей інактивації потрібні великі концентрації іонів міді [78].

Будь-який реагентний спосіб знезараження рідких середовищ, до яких відноситься й іонний спосіб, потребує видалення залишкових продуктів, а також побічних хімічних речовин, що утворилися при цьому процесі [79].

Фізичні способи знезараження рідких середовищ

У процесі водопідготовки широке поширення отримав спосіб знезараження із застосуванням ультрафіолетового (УФ) опромінення [41] (рис. 1.6).

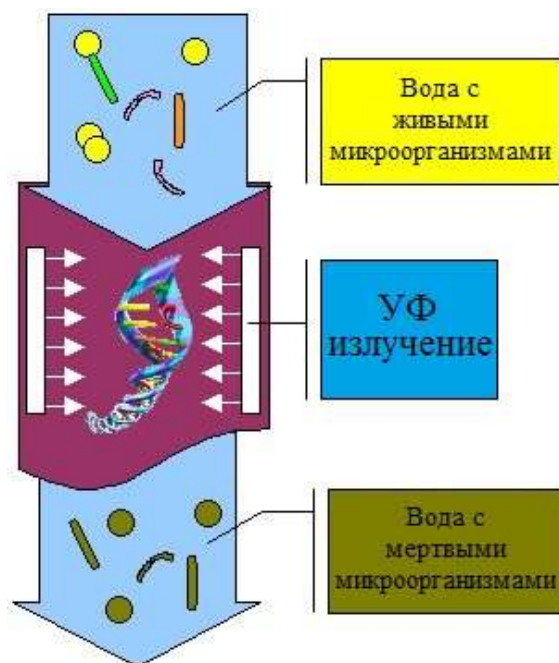


Рис. 1.6 – Схема знезараження рідкого середовища на базі ультрафіолетового випромінювання

Бактерицидна дія УФ опромінення виражається у властивості променів УФ спектру проникати крізь оболонку мікроорганізму у внутрішньоклітинну речовину і впливати на генетичному рівні, руйнуючи ланцюжки молекул ДНК і РНК, перешкоджаючи їх життєдіяльності і подальшому розмноженню [80, 81].

Технологія водопідготовки фізичним способом із застосуванням УФ опромінення має ряд переваг перед хімічними способами:

- відсутня необхідність видалення і контролю побічних продуктів хімічних реакцій з обробленої рідини у зв'язку з відсутністю таких;
- відсутня необхідність застосування спеціальних заходів з техніки

безпеки при перевезенні, зберіганні і роботі з токсичними матеріалами;

- відсутня необхідність постійної закупівлі реагентів для процесу інактивації мікроорганізмів;

- відсутня необхідність залучення висококваліфікованого персоналу, відповідно відсутня необхідність в проведенні заходів щодо підготовки і перевірки їх знань й умінь.

Перераховані переваги цього способу знезараження вигідно виділяють його серед інших. Незважаючи на переваги УФ способу знезараження рідких середовищ, слід зазначити і його недоліки [82, 83]:

- рідина після обробки може піддаватися повторному забрудненню через відсутність ефекту післядії;

- УФ установки чутливі до перепадів напруги в мережі, що може викликати відключення бактерицидної лампи. Відповідно існує деякий час, коли установка не здатна знезаражувати, а рідина продовжує поступати до споживача;

- бактерицидний ефект УФ установки значною мірою залежить від прозорості рідини і механічного забруднення;

- промені, що випускаються УФ лампами, швидко втрачають свою ефективність в товщі води. Тому ефект знезараження здійснюється тільки поблизу лампи;

- низький коефіцієнт корисної дії УФ ламп (менше 8,5%). Це пояснюється тим, що УФ лампа випромінює увесь спектр УФ діапазону, а для знезараження використовується лише його частина;

- складність проведення оперативного контролю за ефективністю знезараження і якістю отриманого продукту;

- жорсткість рідини може привести до інкрустації на поверхні УФ лампи, що призводить до зниження ефективності установки.

Все більше поширення отримує спосіб знезараження води за

допомогою ультразвуку [34] (рис. 1.7).

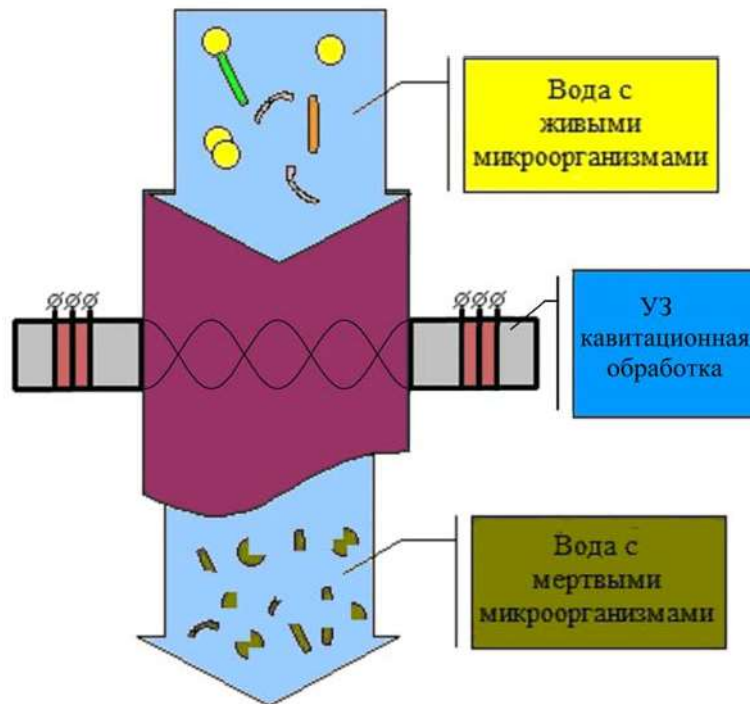


Рис. 1.7 – Схема знезараження рідких середовищ способом ультразвукової кавітації

Бактерицидні властивості цього способу реалізуються за рахунок [84, 85]:

- руйнівної дії кумулятивного струменя, що утворюється при схлопуванні кавітаційної бульбашки, що знаходиться у безпосередній близькості від мікроорганізму або безпосередньо всередині, викликаючи механічне руйнування;

- локального підвищення температури при сплескуванні кавітаційної бульбашки, що призводить до термічного руйнування;

- перепаду тисків по довжині мікроорганізму в стоячій ультразвуковій хвилі, що призводить до порушення цілісності структури мікроорганізму;

- активізації хімічних окислювальних процесів в кавітаційному середовищі, що призводять до прискорення процесу інактивації

мікроорганізмів завдяки утворенню хімічно активних вільних радикалів й інтенсивному перемішуванню на молекулярному рівні хімічних реагентів, що знаходяться в рідині.

Наведені вище переваги безреагентного способу знезараження рідких середовищ на прикладі УФ способу відносяться і до ультразвукового. До перерахованого також варто додати, що [86]:

- апарати, які використовуються для знезараження рідких середовищ при виготовленні їх із кавітаційно стійких матеріалів, мають дуже тривалий термін служби, забезпечують стабільну якість обробки і не вимагають обслуговування висококваліфікованими фахівцями;

- висока швидкодія ультразвукових установок, які застосовуються для інактивації мікроорганізмів, дозволяє використати їх для обробки рідких середовищ, як в ємності, так і в потоці;

- для ультразвукової кавітаційної обробки не має значення мутність води, її хімічний і фізичний склад;

- внаслідок руйнування в кавітаційному середовищі кристалічної решітки солей на внутрішніх поверхнях кавітаційних апаратів не спостерігається інкрустація;

- ультразвукова кавітаційна обробка рідини може застосовуватися одночасно з технологією фільтрації. При цьому фільтруючий елемент, поміщений в кавітаційну зону, постійно самоочищається, забезпечуючи стабільність своїх характеристик.

Різновид і кількість мікроорганізмів, які можуть бути інактивовані в процесі ультразвукової кавітаційної обробки, безпосередньо залежить від інтенсивності ультразвукової хвилі, що вводиться в рідину. Експериментальні дослідження показують, що для досягнення високої ефективності процесу інактивації мікроорганізмів ультразвуковим кавітаційним способом необхідно забезпечити рівень інтенсивності

ультразвуку вище 20...30 Вт/см². При введенні в рідину хвилі малої інтенсивності (менше 2 Вт/см²) спостерігається інтенсифікація процесу розмноження мікроорганізмів [87].

1.1.6. Проблеми створення технологічного обладнання для ультразвукового кавітаційного знезараження рідких середовищ

Оскільки явище кавітації є основним в процесі ультразвукового знезараження рідини, виникає проблема створення технологічного обладнання, що дозволяє вводити в кавітаційну камеру ультразвук з інтенсивністю більше 30 Вт/см² при щільності енергії більше 0,2 Вт/см³.

Подібне обладнання для досягнення високого рівня ефективності повинне задовольняти ряду специфічних вимог [88]:

- підтримка режиму розвиненої кавітації в усьому об'ємі технологічної камери;
- забезпечення високої ефективності введення в рідину ультразвукової енергії;
- забезпечення концентрації ультразвукової енергії в рідині до необхідного рівня інтенсивності;
- забезпечення довговічності роботи технологічної кавітаційної камери і резонансних приводів-випромінювачів;
- можливість застосування додаткових шляхів підвищення інтенсивності кавітації, що полягають в підвищенні статичного тиску, штучному насиченні води зародками кавітації, регулюванні температури рідини, а також імпульсній низькочастотній модуляції ультразвукового сигналу.

Для реалізації технологічного процесу ультразвукового кавітаційного знезараження рідких середовищ можуть бути використані

широко поширені відкриті тонкостінні кавітаційні ванни (рис. 1.8) [89].



a)

б)

Рис. 1.8 – Кавітаційна ванна з $\frac{1}{2}$ - хвильовими резонансними приводами- випромінювачами на донній поверхні (а) та всіх поверхнях (б)

У цих ваннах для збудження кавітації використовуються мало амплітудні $\frac{1}{2}$ -хвильові приводи-випромінювачі, які встановлюються на донній або бічних поверхнях ванни. Взаємовплив випромінювачів вдається усунути за рахунок малої товщини стінок ванни, при якій в стінках не збуджуються високочастотні згинальні коливання. Завдяки можливості збільшення площі випромінювання за рахунок конічної форми активної накладки, що розширюється, резонансного приводу-випромінювача в цих конструкціях вдається добре погоджувати привід-випромінювач з навантаженням. При цьому на випромінюючій поверхні не утворюється двофазний кавітаційний прошарок, який поглинає і розсіює ультразвук, зменшуючи акустичний опір навантаження. В результаті досягається висока ефективність введення в рідину ультразвукової енергії. У таких ваннах доцільно доводити інтенсивність ультразвуку до 8...10 Вт/см².

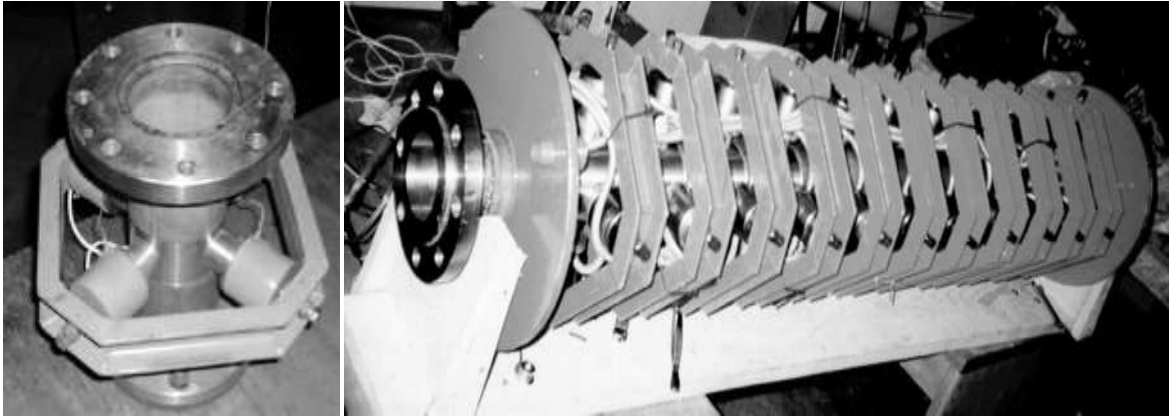
Амплітуда коливань випромінюючої поверхні резонансних приводів у цьому випадку складає близько 5 мкм. Проте такої інтенсивності недостатньо для інактивації широкого спектру мікроорганізмів. У подібних конструкціях максимальна інтенсивність ультразвуку спостерігається тільки поблизу випромінюючої поверхні резонансного приводу. Інтенсивна кавітація на вібруючій поверхні випромінювача призводить до швидкого ерозійного руйнування робочої поверхні. Тонкі стінки кавітаційної камери не дозволяють використати для інтенсифікації кавітаційних процесів підвищений статичний тиск.

Таким чином, відкриті тонкостінні непроточні ванни не дозволяють здійснити якісне знезараження рідини навіть при малій продуктивності і тому вони доцільні тільки для технологічних процесів кавітаційного очищення і миття виробів різного призначення.

Відомі проточні товстостінні кавітаційні камери (рис. 1.9).

Ці камери виконані у вигляді труби зі встановленими на твірній поверхні резонансними приводами-випромінювачами [89]. У цьому випадку можуть застосовуватися як малоамплітудні приводи, так і ножевидні високоамплітудні, у яких збільшення амплітуди коливань досягається за рахунок використання трансформаторів коливальної швидкості [90, 91].

Малоамплітудні приводи навіть при точному приляганні до циліндричної твірної поверхні труби, внаслідок коливань стінок труби, випромінюють тільки по лінії, тобто не здатні забезпечити високу ефективність введення ультразвукової енергії всередину труби. Приводи з трансформатором коливальної швидкості, що мають зменшену площу випромінюючого торця, забезпечують набагато більшу ефективність збудження в трубі коливань. Вони щонайменше гасять збуджувані в трубі коливання.



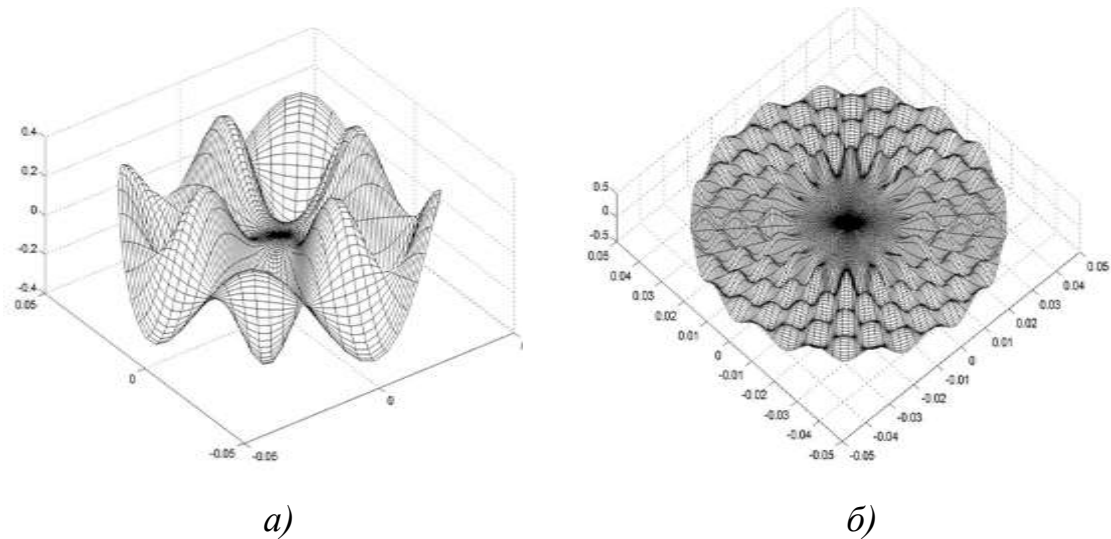
a)

б)

Рис. 1.9 – Односекційна (а) та багатосекційна (б) проточна товстостінна кавітаційні камери

Подібні конструкції традиційно збуджують в трубі радіально-вигинисті коливання.

Характерна картина ультразвукового поля в поперечному перерізі такої труби представлена на рис. 1.10 [89].



a)

б)

Рис. 1.10 – Форми ультразвукового поля в циліндричній камері при збудженні радіально - згинних коливань поверхні (а - чотири привода – випромінювача, друга мода коливань; б – шістнадцять приводів-випромінювачів, сьома мода коливань)

Для усунення взаємовпливу приводів-випромінювачів і досягнення максимальної ефективності коливань труби її розміри вибирають резонансними, а приводи встановлюють в пучностях хвилі деформації і підключають до генератора електричних коливань з урахуванням фазування. Такі камери дозволяють обробляти рідину під підвищеним статичним тиском. Оскільки подібні конструкції не концентрують в рідині ультразвукову енергію, вони дозволяють у внутрішньому об'ємі циліндричної проточної камери створити ультразвукове поле з інтенсивністю до 10 Вт/см^2 і рівномірно обробляти увесь потік рідини. Спроба підвищення інтенсивності коливань призводить до утворення кавітаційного прошарку на внутрішній поверхні труби, що призводить до зниження ефективності роботи. Підвищення щільності ультразвуку досягається збільшенням кількості приводів в секції і збільшенням кількості секцій, встановлених уздовж труби. У товстостінних резонансних кавітаційних камерах можна застосовувати підвищений статичний тиск і тим самим підвищити ефективність кавітаційної обробки.

Такі кавітаційні камери зручні для обробки рідини в потоці. Вони дозволяють отримувати якісні емульсії, які довго не розшаровуються, дозволяють активувати хімічні процеси і так далі. Проте вони не є ефективними стерилізуючими апаратами.

Логічним шляхом підвищення інтенсивності ультразвукових коливань є збільшення амплітуди коливань випромінюючої поверхні малоамплітудних ультразвукових випромінювачів. Збільшення амплітуди коливань може бути досягнуте за рахунок застосування в $\frac{1}{2}$ -хвильовому перетворювачі Ланжевена частотопонижуючих накладок, виконаних з матеріалів, які мають різну щільність. У такому перетворювачі внаслідок закону збереження кількості руху

випромінююча торцева поверхня накладки виконана з матеріалу, який має меншу щільність, коливатиметься з більшою амплітудою. Збільшення амплітуди коливань може бути досягнуте і за рахунок застосування стержневих трансформаторів коливальної швидкості. Зазвичай використовуються ступінчасті, експоненціальні, конічні, катеноїдальні й інші концентратори. Вихідний торець трансформатора коливальної швидкості за рахунок збільшення амплітуди коливань забезпечить введення в рідину ультразвукової хвилі підвищеної інтенсивності. Проте такий шлях рішення задачі отримання в рідині високоінтенсивних ультразвукових коливань призводить до того, що вже при досить не високій інтенсивності коливань на випромінюючій поверхні трансформатора утворюється двофазний кавітаційний прошарок, який починає поглинати і розсіювати ультразвук. У результаті ефективність введення в рідину ультразвукових коливань різко падає. Крім того, кавітаційний прошарок, що виникає на випромінюючій поверхні, призводить до інтенсивного ерозійного зносу випромінюючої поверхні. Тому такий шлях отримання в рідині ультразвукових коливань високої інтенсивності застосовний тільки в дуже обмеженій області кавітаційних технологій. В основному це технології лабораторного, а не промислового застосування.

Проведений аналіз показує, що при створенні високоефективного ультразвукового стерилізуючого апарату необхідно забезпечити введення в кавітаційну камеру ультразвуку малої інтенсивності і передбачити подальше акустичне фокусування коливань в рідині.

Істотного локального підвищення інтенсивності ультразвуку вдається досягти за рахунок фокусування коливань вздовж осі труби або у фокусі збираючої акустичної лінзи [88].

Апарати з півсферичною (рис. 1.11) або сферичною (рис. 1.12)

[92, 93] акустичною лінзою зважаючи на свою низьку технологічність, малу продуктивність і трудність реалізації обробки рідини в потоці, застосовуються тільки в дослідницьких цілях.

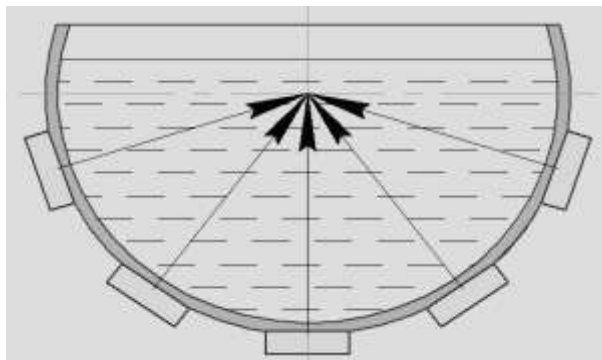


Рис. 1.11 – Півсферичний ультразвуковий кавітаційний апарат з фокусуванням коливань в точці

Вони дозволяють у фокальній області досягти інтенсивності звуку близько 200 Вт/см^2 і більше. Проте реалізація з їх допомогою технологічного процесу знезараження рідини в потоці дуже проблематична.

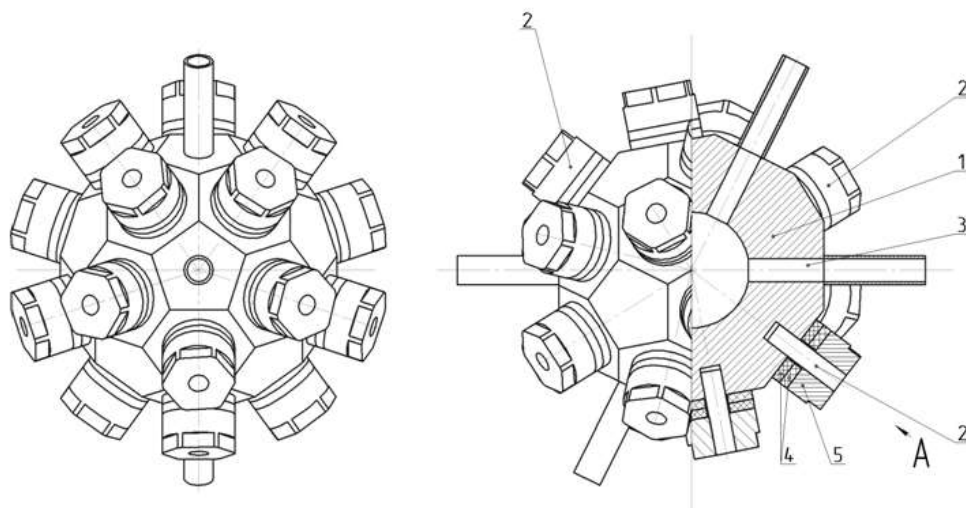


Рис. 1.12 – Сферичний ультразвуковий кавітаційний апарат з фокусуванням коливань в точці (1 – технологічний об'єм; 2 – ультразвукові перетворювачі; 3 – канал для підвода та відводу; 4 – п'єзоелектричний елемент; 5 – демпфер)

Фокусування вздовж осі труби може бути реалізоване за допомогою високоамплітудного резонансного приводу, випромінюючого ультразвукові коливання вздовж осі нерезонансної циліндричної кавітаційної камери (рис. 1.13) [88]. Фокусування досягається за рахунок відбиття хвилі від внутрішньої циліндричної поверхні камери. Конструктивне збільшення площі випромінюючої поверхні дозволяє забезпечити досить високу підведену потужність при доброму узгодженні з навантаженням [94 – 97].

У таких технологічних апаратах в центральній частині циліндричної камери вдається підвищити інтенсивність ультразвуку до 20 Вт/см^2 . Подальше підвищення підведеної енергії призводить до утворення парогазового прошарку на випромінюючій поверхні і зниження ефективності введення в рідину ультразвукових коливань, що не дозволяє створити установки досить великої потужності.

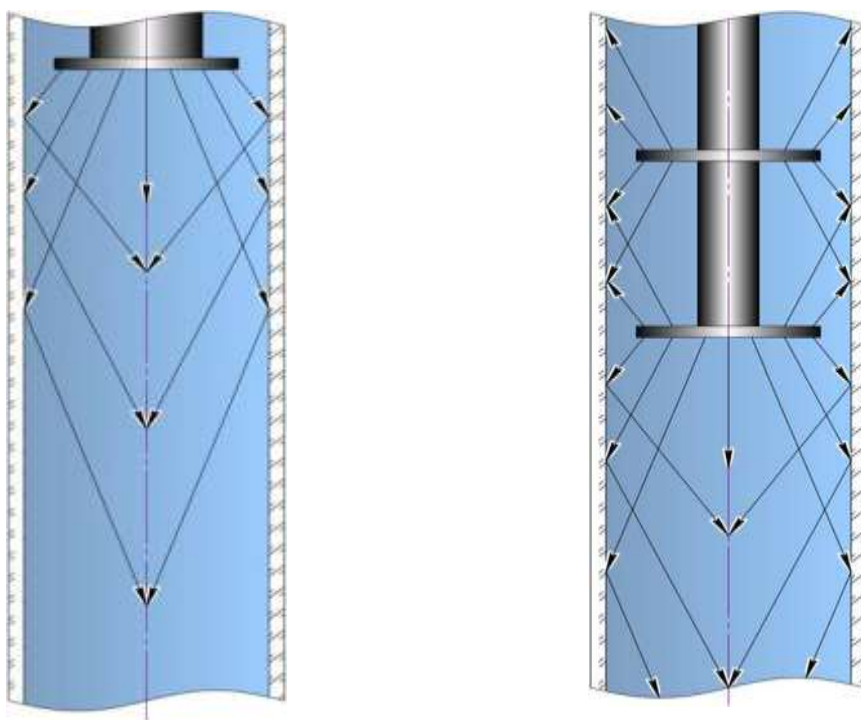


Рис. 1.13 – Картина концентрації ультразвукових коливань вздовж осі циліндричної камери, при випромінненні коливань високоамплітудним приводом

Оскільки випромінюючі поверхні таких приводів виконуються в пучностях стоячої повздовжньої хвилі деформації, вони схильні до інтенсивної кавітаційної ерозії. Тому ультразвукові стерилізаційні апарати, побудовані за таким принципом, не задовольняють вимозі довговічності.

Концентрація ультразвукової енергії вздовж осі циліндричної проточної камери може бути досягнута також за рахунок збудження радіальної моди коливань циліндричної стінки камери (рис. 1.14).

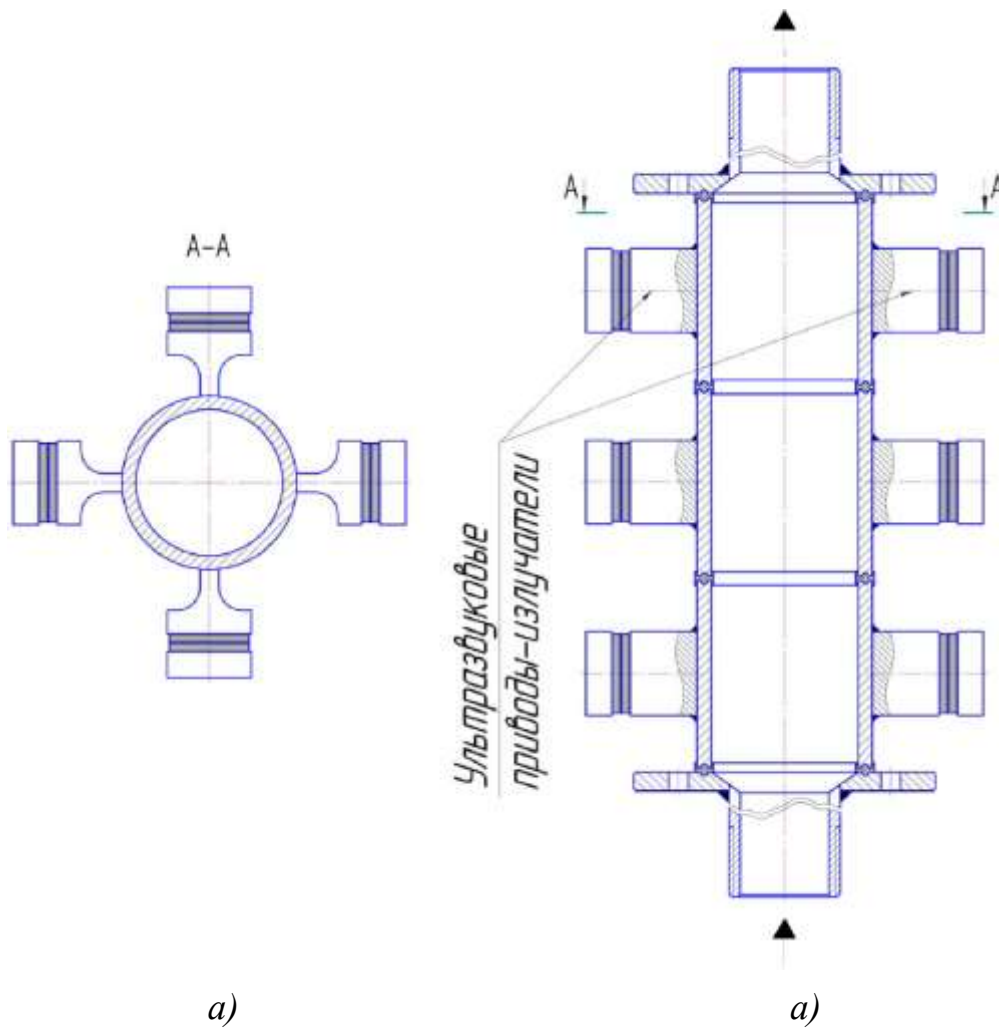


Рис. 1.14 – Схеми трубчатого вібратора з ультразвуковими приводами на твірній поверхні (а) і багатосекційного проточного кавітатора з ультразвуковими акустично розв'язаними трубчатими вібраторами (б)

Для забезпечення компактності установки за рахунок виключення ділянок, що деформуються з малою амплітудою, труби в області вузлів коливань і ліквідації радіально-вигинистої хвилі уздовж циліндричної поверхні камери кавітації, останню виконують у вигляді набору окремих ущільнених трубчастих вібраторів, що збуджуються на радіальній моді коливань і мають товщину кільця менше половини довга хвилі подовжньо-вигинистих коливань [98]. Для ефективного збудження коливань і зменшення міри спотворення коливань на зовнішній поверхні, що утворює, встановлюють ультразвукові резонансні приводи з ножевидними трансформаторами коливальної швидкості [99].

У цьому випадку за рахунок великої поверхні випромінювання в рідину вдається ввести істотно більший рівень ультразвукової енергії. На внутрішній поверхні вібраторів при цьому не утворюється кавітаційний прошарок, а слабка кавітаційна ерозія випромінюючої внутрішньої поверхні кільця забезпечує довговічність кавітаційної камери (рис. 1.15). У такій конструкції вдається забезпечити інтенсивність звуку $20...100 \text{ Вт/см}^2$.

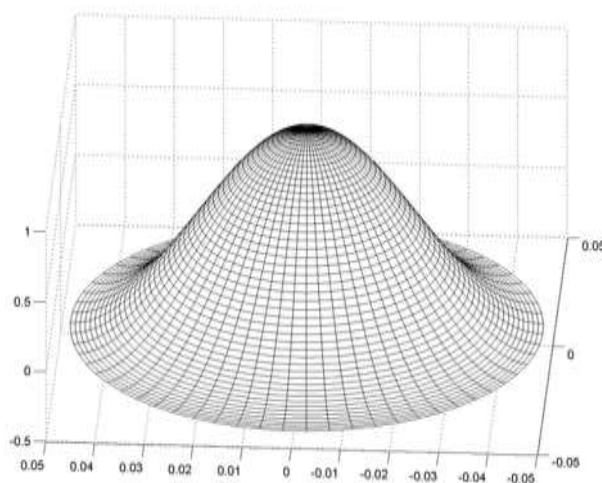


Рис. 1.15 – Форма ультразвукового поля в циліндричній камері при збудженні радіальних коливань

Проведений аналіз показує, що для реалізації технологічного процесу ультразвукового кавітаційного знезараження рідини найбільш доцільні апарати з проточною циліндричною кавітаційною камерою, що здійснює радіальні коливання і забезпечує концентрацію ультразвукової енергії вздовж осі камери. Такі апарати якнайповніше задовольняють сформульованим вимогам.

Для створення подібного технологічного ультразвукового кавітаційного обладнання необхідно розробити схемні рішення, що забезпечують реалізацію сформульованих вимог, а також створити методичне забезпечення для інженерного проектування.

1.2. Ультразвукове кавітаційне обладнання з концентрацією ультразвукової енергії

Аналіз відомих конструкцій ультразвукових трубчастих проточних кавітаторів показує, що для фокусування ультразвукової енергії вздовж осі камери найбільш доцільний спосіб концентрації ультразвукової енергії за рахунок радіальних коливань вібратора [88]. При цьому необхідно мінімізувати спотворення, що вносяться в радіальні коливання кільцевого вібратора приводами-випромінювачами, що забезпечують збудження коливань вібратора. Запропоновано використати для збудження радіальної моди коливань резонансні приводи-випромінювачі з нежевидними трансформаторами коливальної швидкості, що контактують із зовнішньою поверхнею трубчастого вібратора уздовж твірної лінії [98].

Для виключення поздовжньо-згинних коливань, що збільшують розміри кавітаційної камери і призводять до необхідності врахування взаємовпливу приводів-випромінювачів, найдоцільніше кавітаційну камеру робити у вигляді окремих трубчастих вібраторів і забезпечити

акустичну розв'язку окремих вібраторів.

1.2.1. Схеми обладнання для кавітаційної обробки рідини в потоці високоінтенсивним ультразвуком

Підвищення ефективності обробки рідини і зменшення габаритів технологічного устаткування для ультразвукової кавітаційної обробки рідини реалізоване в конструкції проточного трубчастого ультразвукового кавітаційного обладнання, представленого на рисунку 1.16.

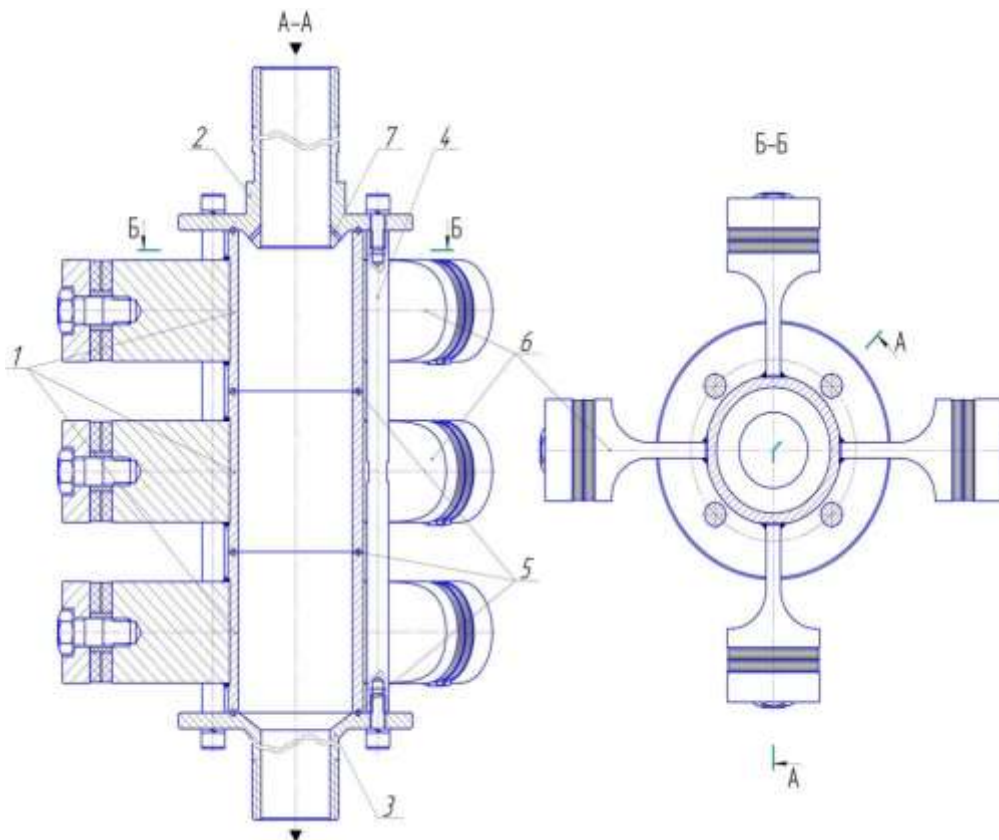


Рис. 1.16 – Схема проточного трубчастого ультразвукового кавітатора

(1 - трубчатий вібратор; 2 - вхідний фланець; 3 - вихідний фланець; 4 - шпилька; 5 - ущільнювач; 6 – п'єзоелектричні приводи; 7 – отвір для виходу повітря)

Запропонована конструкція (рис. 1.16) [98] складається з трубчастих вібраторів 1, які утворюють за допомогою фланців 2, 3 і шпильок 4 вертикально розташовану проточну кавітаційну камеру. За рахунок ущільнень 5 забезпечена герметизація кавітаційної камери і акустична розв'язка трубчастих вібраторів 1. Для збудження резонансних коливань трубчастих вібраторів використані резонансні п'єзоелектричні приводи 6 повздовжніх переміщень. П'єзоелектричні приводи 6 представляють собою складені перетворювачі Ланжевена, що забезпечують перетворення електричних коливань генератора (на схемі умовно не показаний) в механічні пружні повздовжні коливання. Для збільшення амплітуди коливань використані трансформатори коливальної швидкості. Перетворювач Ланжевена спільно із ступінчастим трансформатором коливальної швидкості утворює півхвильову акустичну систему, у якій пучність коливань знаходиться в області торцевої поверхні приводу. П'єзоелектричні резонансні приводи 6 жорстко і акустично прозоро, прижаті до зовнішньої твірної поверхні трубчастих вібраторів 1. Для зменшення негативної дії приєднаних приводів 6 на форму коливань трубчастих вібраторів 1 трансформатори коливальної швидкості мають ножевидну форму ступені меншої площі і розміщені вздовж зовнішньої твірної поверхні вібраторів. Видалення повітря, що виділяється з прокачуваної через камеру рідини в результаті акустичної дегазації, забезпечується за допомогою отворів 7. Фланець 2 конструктивно забезпечує течію оброблюваної рідини вздовж осі камери, обмежуючи її рух поблизу внутрішньої поверхні трубчастих вібраторів. Для збільшення ефективності кавітаційної обробки рідини, наприклад, в технологічному процесі інактивації шкідливих і небезпечних для здоров'я людини мікроорганізмів проточна кавітаційна камера з трубчастими вібраторами додатково обладнана шнековим приводом 8 з

електричним керуванням (рис. 1.17) [99, 100] для подачі в потік рідини механічних домішок, наприклад, дрібного кварцового піску або іншого абразивного порошку.

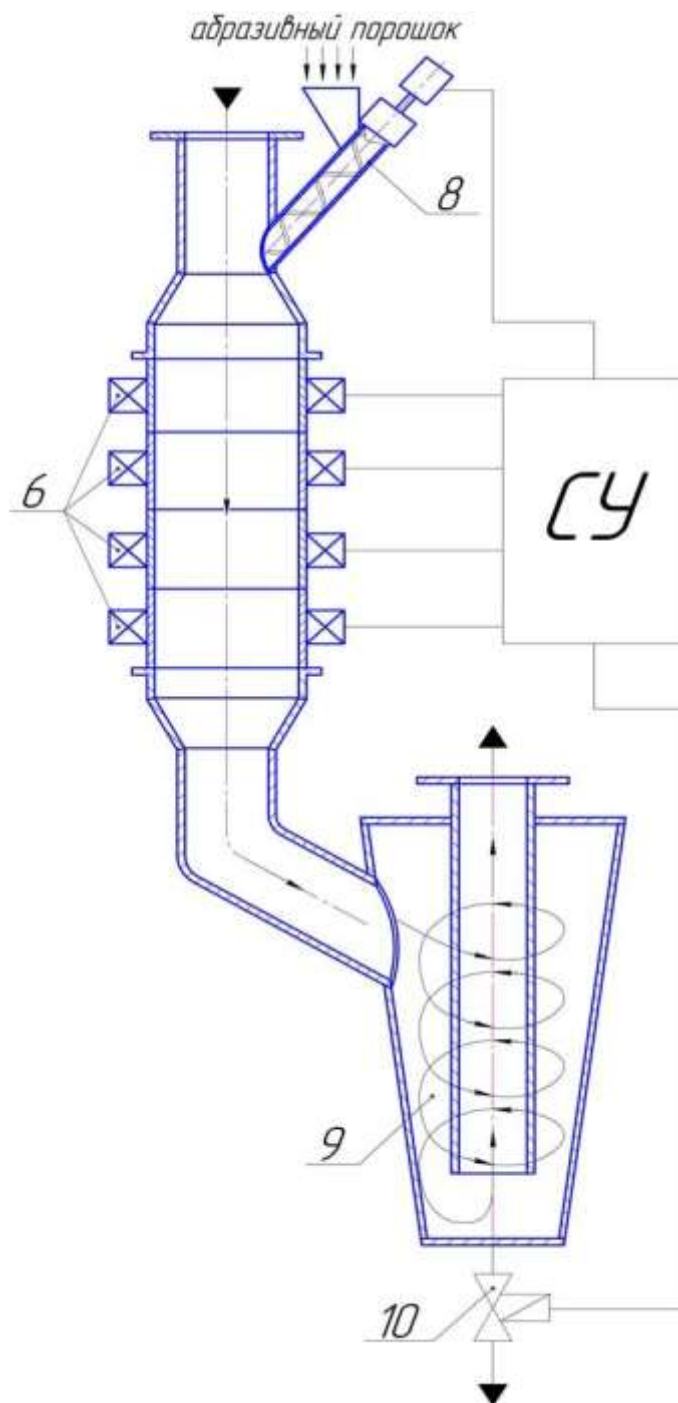


Рис. 1.17 – Схема проточного трубчатого ультразвукового кавітатора підвищеної ефективності з використанням абразивного порошку

Видалення абразивного порошку після кавітаційної обробки рідини здійснюється за допомогою фільтру 9, наприклад, відцентрового типу. Осад абразивного порошку, що скупчився, періодично скидається за допомогою клапана 10 з електромагнітним управлінням.

Для додаткового підвищення ефективності кавітаційної обробки потоку рідини можливе виділення області з максимальною інтенсивністю кавітації за допомогою труби 11, яка проходить вздовж осі трубчастої кавітаційної камери [99].

При цьому замкнутий міжтрубний простір 12 (рис. 1.18) заповнено дегазованою рідиною, що дозволяє з мінімальними втратами передати ультразвукові коливання від стінок трубчастого вібратора до центральної труби, по якій йде потік оброблюваної рідини.

Для зниження втрат ультразвукової енергії із-за спотворення звукового поля при введенні ультразвукових коливань в центральну трубу 11 вона має діаметр, рівний парній кількості чвертей довжини хвилі 13, випромінюваних в рідину коливань.

Збільшення часу кавітаційної обробки протікаючого потоку рідини досягається за рахунок установки в трубі 11 направляючого апарату 14, який забезпечує закручування потоку.

У разі потреби акустична розв'язка трубчастих вібраторів може бути досягнута за рахунок вибору довжини вібратора кратного парній кількості чвертей довжини радіально-згинних хвиль 15. При цьому кріплення вібратора здійснюється у вузлових точках стоячої хвилі деформації 15, а сусідні секції п'єзоелектричних приводів подовжніх переміщень підключаються до генератора електричних коливань протифазно.

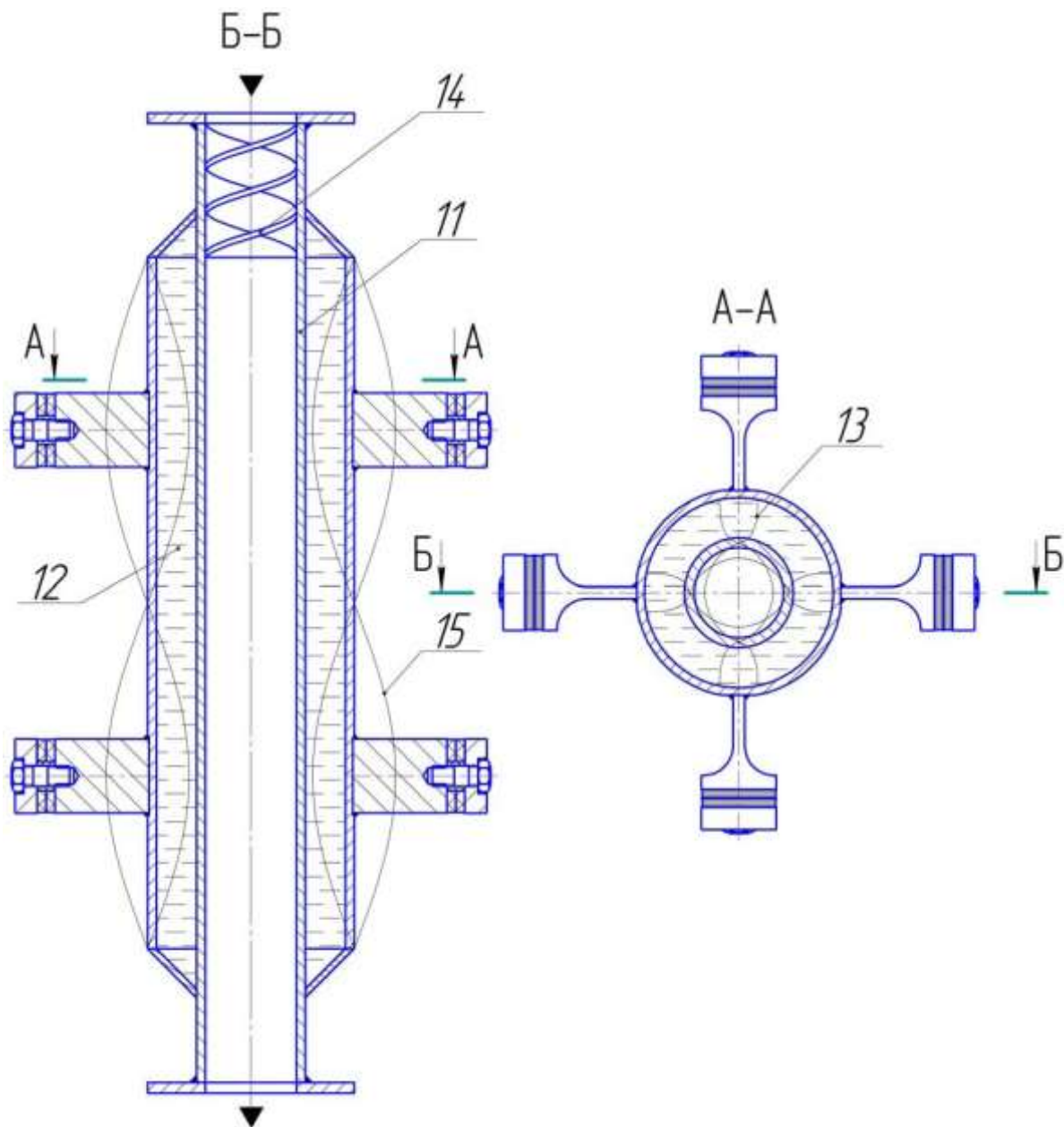


Рис. 1.18 – Схема проточного трубчатого ультразвукового кавітатора підвищеної ефективності та довговічності з використанням проміжної гідравлічної міжтрубної камери

Працює запропоноване технологічне обладнання наступним чином.

На електроди п'єзоелектричних перетворювачів подається синусоїдальна високочастотна напруга від генератора електричних коливань. В результаті зворотного п'єзоефекту відбувається збудження пружних механічних коливань по товщині п'єзокерамічних шайб, що

викликає виникнення поперечної хвилі деформації в п'єзоелектричних приводах 6. Акустичні поперечні розміри частин приводу (демпфуючої накладки і ультразвукового трансформатора коливальної швидкості) підбрані таким чином, що в приводі виникають резонансні коливання і по довжині приводу встановлюється стояча хвиля пружної деформації.

Трансформатори коливальної швидкості передають ультразвукові коливання в заповнені рідиною трубчасті вібратори 1. При цьому, якщо трубчасті вібратори 1 збудити на нульовій моді радіальних коливань, то вібратори почнуть здійснювати чисто радіальні коливання, випромінюючи ультразвукову енергію у напрямі центральної поперечної осі вібраторів. У результаті в області поперечної осі вібраторів концентруватиметься ультразвукова енергія, викликаючи в прокачуваній рідині явище кавітації. При цьому на внутрішній поверхні трубчастих вібраторів 1 інтенсивність ультразвуку буде недостатньою для збудження кавітації. Тому на цій поверхні не утворюватиметься двофазний кавітаційний прошарок, що знижує ефективність введення в рідину ультразвукової енергії за рахунок поглинання і розсіювання ультразвуку, а також може призвести до поступового ерозійного руйнування внутрішньої поверхні трубчастих вібраторів.

Інтенсивна кавітаційна обробка потоку рідини дозволяє за рахунок явищ, які супроводжуються зародження, коливання в ультразвуковому полі і схлопування кавітаційних бульбашок, підвищити хімічну активність рідини (активувати рідину), зруйнувати кристалічну решітку солей (запобігти інкрустації), перемішувати компоненти рідини на молекулярному рівні (отримати стійкі емульсії), інактивувати мікроорганізми в рідині (знезаразити рідину) і т. д.

Введення в турбулентну кавітаційну область абразивного порошку дозволяє посилити механізм механічного руйнування твердих

забруднень при очищенні деталей або небезпечних для здоров'я людини мікроорганізмів [101].

1.3. Аналітичне дослідження роботи ультразвукового трубчастого кавітатора з радіальною формою коливань

Для досягнення високої ефективності технологічного обладнання, що реалізовує ультразвукову кавітаційну обробку за допомогою циліндричного вібратора, що здійснює радіальні коливання, потрібне знання особливостей утворення звукового поля в технологічному об'ємі за різних умов збудження.

Для розробників подібного ультразвукового кавітаційного обладнання важлива інформація як про форму та інтенсивність кавітаційної області всередині трубчастого вібратора, так і про розташування кавітації вздовж підвідного та відвідного трубопроводів. Важливі також питання впливу на конфігурацію звукового поля умов затискання трубчастої кавітаційної камери торцевими кришками різної конфігурації.

1.3.1. Особливості виникнення кавітації в технологічному об'ємі ультразвукового трубчастого кавітатора з радіальною формою коливань

Кавітаційна камера яка піддавалась дослідженню представляє собою (рис. 1.19) відрізок труби, довжина якого менше половини довжини хвилі збуджуваних в трубі резонансних радіальних коливань. На зовнішній твірній поверхні труби 2 встановлені півхвильові ультразвукові вібраційні приводи 1, вихідні ступені трансформаторів швидкості яких мають ножевидну форму і розміщені вздовж твірної циліндричної поверхні камери. Вібраційні приводи збуджують в трубчастому вібраторі

резонансні коливання радіальної форми. Подібна форма трансформаторів коливальної швидкості забезпечує ефективну передачу ультразвукових коливань в трубчастий вібратор при найменшому негативному впливі на форму збуджуваних в ній коливань.

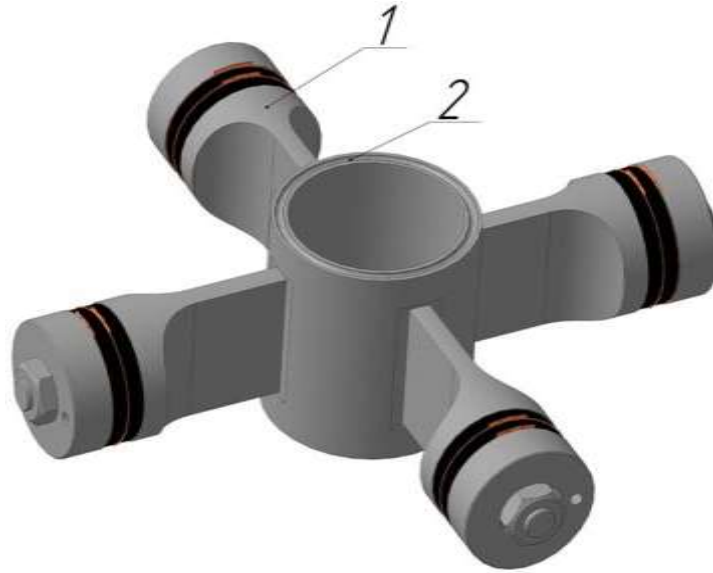


Рис. 1.19 – Ультразвукова проточна кавітаційна камера у вигляді трубчастого вібратора

У заповненому рідиною технологічному об'ємі кавітаційної камери конфігурація кавітаційної області повторює конфігурацію поля звукового тиску. При цьому інтенсивність кавітаційних явищ буде пропорційна величині звукового тиску [102].

Вирішення задачі стосовно конфігурації поля в циліндричній кавітаційній камері доцільно проводити в циліндричній системі координат. Відповідно до розрахункової схеми (рис. 1.20) вісь z спрямована уздовж осі циліндра, а початок координат збігається з віссю циліндра. Нехай висота циліндра рівна h , а радіус a .

Хвилеве рівняння в циліндричних координатах для потенціалу швидкості Φ має вигляд [103]:

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \Phi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2}$$

де r – радіус-вектор; φ – полярний кут; c – швидкість звуку в рідині.

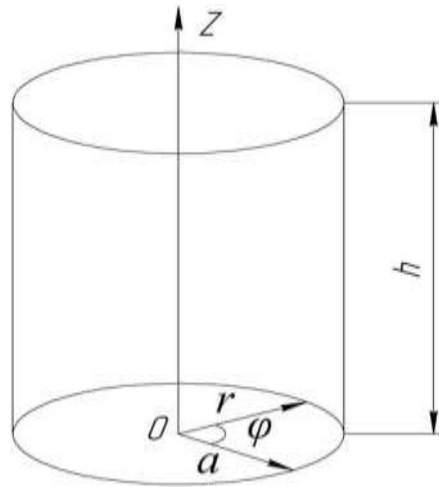


Рис. 1.20 – Розрахункова схема проточної кавітаційної камери у вигляді трубчастого вібратора, що здійснює радіальні коливання

У разі, якщо в циліндрі відсутні згинні коливання, потенціал швидкості Φ не залежатиме від φ і рівняння дещо спроститься:

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \Phi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2}. \quad (1.1)$$

Розв'язок рівняння (2.1) зручно шукати методом розділення змінних Фур'є. Нехай потенціал швидкості є добутком трьох функцій:

$$\Phi(r, z, t) = R(r) \cdot Z(z) \cdot T(t), \quad (1.2)$$

де функція $R(r)$ залежить тільки від r , $Z(z)$ залежить тільки від z та $T(t)$ залежить тільки від t .

Підставивши (1.2) в (1.1) і розділивши результат на $R(r) \cdot Z(z) \cdot T(t)$, отримаємо:

$$\left(\frac{1}{R(r)} \frac{\partial^2 R(r)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{1}{R(r)} \frac{\partial R(r)}{\partial r} \right) + \left(\frac{1}{Z(z)} \frac{\partial^2 Z(z)}{\partial z^2} \right) = \frac{1}{c^2} \frac{1}{T(t)} \frac{\partial^2 T(t)}{\partial t^2}. \quad (1.3)$$

Вираз в перших дужках залежить тільки від r , в других дужках - тільки від z , а права частина залежить тільки від t . Рівняння (1.3) тотожно тільки тоді, коли вирази в дужках дорівнюють постійним величинам. Отже, рівняння (1.3) розпадається на систему рівнянь:

$$\frac{1}{c^2} \frac{1}{T(t)} \frac{\partial^2 T(t)}{\partial t^2} = k^2, \quad (1.4)$$

$$\left(\frac{1}{Z(z)} \frac{\partial^2 Z(z)}{\partial z^2} \right) = k_z^2, \quad (1.5)$$

$$\left(\frac{1}{R(r)} \frac{\partial^2 R(r)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{1}{R(r)} \frac{\partial R(r)}{\partial r} \right) = k_r^2. \quad (1.6)$$

При цьому, виходячи з (2.3), виконується умова

$$k_r^2 + k_z^2 = k^2 \quad (1.7)$$

Привівши рівняння (1.6) до виду

$$\frac{\partial^2 R(r)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial R(r)}{\partial r} + k_r^2 R(r) = 0,$$

отримуємо рівняння, рішенням якого є циліндрична функція Бесселя нульового порядку [104]:

$$R(r) = J_0(k_r r). \quad (1.8)$$

Рішенням рівняння (1.5) є комбінація гармонійних функцій:

$$Z(z) = A \sin(k_z z) + B \cos(k_z z), \quad (1.9)$$

де A і B константи, визначувані з граничних умов. Рішенням рівняння (1.4) є гармонійна функція

$$T(t) = \sin(\omega \cdot t). \quad (1.10)$$

В результаті підстановки (1.8), (1.9), (1.10) в (1.2), отримуємо:

$$\Phi(r, z, t) = J_0(k_r r) \cdot (A \cdot \sin(k_z z) + B \cdot \cos(k_z z)) \cdot \sin(\omega t). \quad (1.11)$$

Співвідношення між хвилевими числами визначатимуться граничними умовами. Можливі три варіанти граничних умов, які задаються конструктивними особливостями даної кавітаційної камери:

- відсутність торцевих кришок (варіант з м'якими стінками);
- наявність двох торцевих кришок (варіант з жорсткими стінками);
- наявність однієї торцевої кришки (варіант з однією м'якою та з однією жорсткою стінкою).

Так для абсолютно жорсткої стінки, наприклад, торцевої кришки кавітаційної камери коливальна швидкість часток на стінці дорівнює нулю.

$$V_r = -\frac{\partial \Phi}{\partial r} = 0. \quad (1.12)$$

У разі абсолютно м'якої стінки, наприклад, межі рідина-повітря у відкритій кавітаційній камері на межі розділу повинна виконуватися умова рівності нулю величини звукового тиску, а значить і потенціалу швидкості

$$\Phi = 0. \quad (1.13)$$

1.3.2. Аналітичне дослідження роботи ультразвукового трубчастого кавітатора з урахуванням конструктивних особливостей

Розглянемо випадок резонансної кавітаційної камери, закритої по торцях абсолютно м'якими стінками (рис. 1.21).

У такому разі граничні умови наберуть вигляду:

$$\left. \frac{\partial \Phi(r)}{\partial r} \right|_{r=a} = 0, \quad (1.14)$$

$$\Phi(z)|_{z=0} = 0, \quad \Phi(z)|_{z=h} = 0. \quad (1.15)$$

Після підстановки (1.14) в (1.11) і з урахуванням того, що $\frac{\partial J_0(x)}{\partial x} = -J_1(x)$ отримуємо:

$$J_1(k_r r) = 0. \quad (1.16)$$

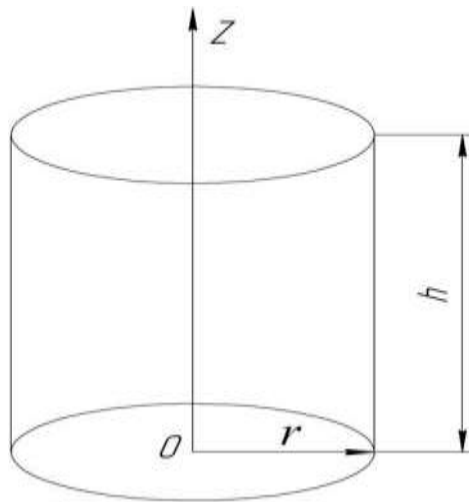


Рис. 1.21 – Схема резонансної кавітаційної камери, закритої по торцях абсолютно м'якими стінками

Значення перших десяти коренів, що задовольняють вираз (1.16), приведені в таблиці 1.1 і графічно представлені на рисунку 1.22.

Таблиця 1.1 – Корні рівняння (1.16)

	Номер кореня, i				
	1	2	3	4	5
$n_i = k_i a$	0	3,832	7,016	10,174	13,324
	Номер кореня, i				
	6	7	8	9	10
$n_i = k_i a$	16,471	19,616	22,76	25,904	29,047

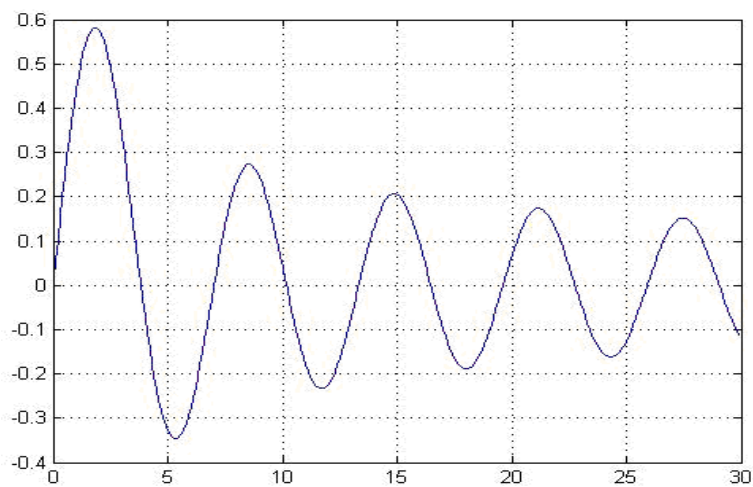


Рис. 1.22 – Функція Бесселя першого порядку

Перший корінь можна відкинути, оскільки він відповідає нульовій частоті, у зв'язку з чим $J_0(0) = 0$.

Для абсолютно м'яких стінок умова (1.15) дає систему двох рівнянь:

$$\begin{cases} A \sin(k_z 0) + B \cos(k_z 0) = 0; \\ A \sin(k_z h) + B \cos(k_z h) = 0. \end{cases}$$

У результаті рішення системи отримуємо:

$$B = 0, \quad k_z \cdot h = \pi \cdot m, \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad (1.17)$$

У результаті для власних частот повинні виконуватися умови:

$$\begin{cases} k_r = \frac{n_i}{a}; \\ k_z = \frac{\pi \cdot m}{h}; \\ k_r^2 + k_z^2 = \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot f}{c} \right)^2. \end{cases} \quad (1.18)$$

З виразу (1.18) можна знайти набір власних частот для рідини в резонансній циліндричній кавітаційній камері заданих геометричних розмірів:

$$f = \frac{c}{2 \cdot \pi} \sqrt{\left(\frac{n_i}{a} \right)^2 + \left(\frac{\pi \cdot m}{h} \right)^2}, \quad (1.19)$$

де m та n_i – натуральне число.

Результати розрахунку набору власних частот рідини, що заповнює трубчасту кавітаційну камеру радіусом 31 мм і висотою 80 мм, наведені в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Набір власних частот резонансної камери

	f , кГц			
	$m = 1$	$m = 2$	$m = 3$	$m = 4$
$i = 2$	30,96	34,96	40,76	47,72
$i = 3$	54,84	57,19	60,91	65,77
$i = 4$	78,91	80,56	83,24	86,86

У якості рідини використовувалася вода із швидкістю звуку 1500 м/с. У технологічних кавітаційних процесах в якості робочого середовища можуть застосовуватися рідини з різними реологічними властивостями [105, 106], що необхідно враховувати при створенні ультразвукових кавітаторів, оскільки їх робота пов'язана з особливостями поширення ультразвукових коливань в цих середовищах.

Найбільш поширеним критерієм для прогнозування поведінки ультразвукової хвилі в товщі рідини є час релаксації рідини. Акустична релаксація характеризує процес відновлення балансу енергії середовища, який був порушений при проходженні звукової хвилі.

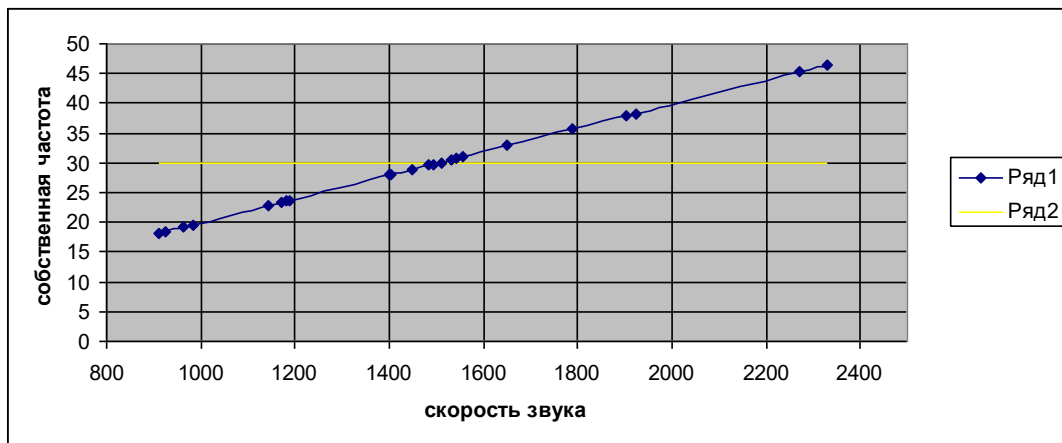
Час акустичної релаксації характеризує тривалість процесу відновлення параметра, що відхилився від рівноважного стану. Для малов'язких рідин, наприклад, води час акустичної релаксації досить малий. Для більшості рідин частота акустичної релаксації знаходиться в діапазоні гіперзвуку.

При проектуванні цих трубчастих кавітаторів параметри акустичної релаксації рідини можуть позначитися при розрахунку резонансних розмірів вібратора і розмірів підведеного та відведеного трубопроводів, по яким можуть поширюватись генеровані в кавітаційній камері, ультразвукові коливання.

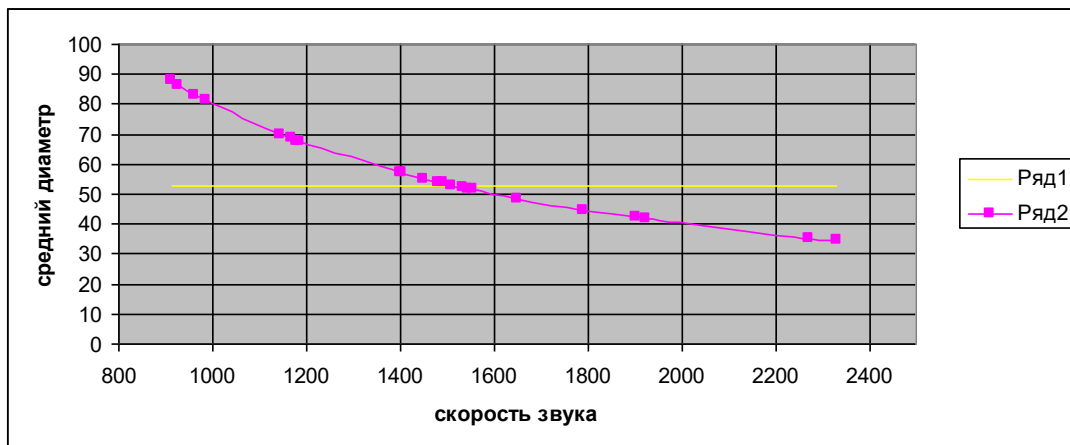
Досліджувана резонансна коливальна система забезпечує концентрацію ультразвукової енергії вздовж осі кавітаційної камери за рахунок збудження в трубчастому вібраторі коливань нульової моди. При цьому в поперечному перерізі кавітаційної камери укладається тільки половина хвилі ультразвукових коливань, а доцільні розміри кавітаційної камери визначають частоту збудження вібратора в діапазоні десятків кГц. У той же час, для більшості рідких середовищ, що транспортуються через досліджуваний трубчастий кавітатор, частота

акустичної релаксації знаходиться в гіперзвуковому діапазоні, що дозволяє в цьому випадку нехтувати впливом на поширення в кавітаційній камері коливань явища акустичної релаксації.

Для прогнозування роботи камери з різними рідинами по аналітичних залежностях (1.19) і вимушеній частоті трубчастого вібратора були побудовані графіки залежності швидкості поширення звукової хвилі в цих рідинах від власної частоти і середнього діаметру трубчастого вібратора (рис. 1.23а, та рис. 1.23б).



а)



б)

Рис. 1.23 – Залежність швидкості поширення звукової хвилі в різних рідинах від власної частоти (а) і середнього діаметра трубчастого вібратора (б)

Приведені графічні залежності дозволяють спроектувати трубчасту кавітаційну камеру, яка забезпечить максимальну ефективність кавітаційної обробки, оскільки частота її резонансних коливань відповідатиме частоті власних коливань рідини, що транспортується.

Розглянемо випадок резонансної кавітаційної камери, закритої по торцях абсолютно жорсткими стінками (рис. 1.24).

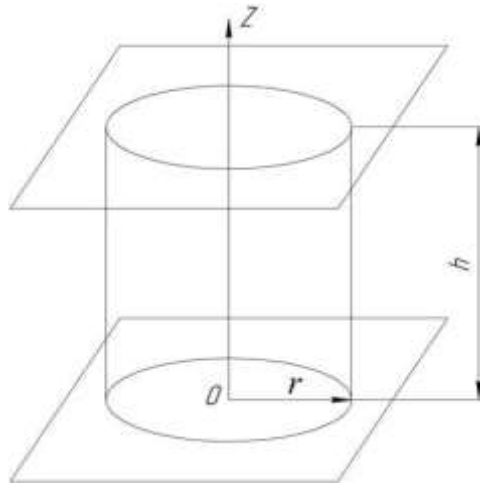


Рис. 1.24 – Схема резонансної кавітаційної камери, закритої по торцях абсолютно жорсткими стінками

У такому разі граничні умови наберуть вигляду:

$$\left. \frac{\partial \Phi(r)}{\partial r} \right|_{r=a} = 0, \quad (1.20)$$

$$\left. \frac{\partial \Phi(z)}{\partial z} \right|_{z=0} = 0, \quad \left. \frac{\partial \Phi(z)}{\partial z} \right|_{z=h} = 0. \quad (1.21)$$

Після підстановки (1.20) в (1.11) і з урахуванням того, що $\frac{\partial J_0(x)}{\partial x} = -J_1(x)$, отримуємо

$$J_1(k_r r) = 0. \quad (1.22)$$

Значення перших десяти коренів, що задовольняють виразу (1.22),

виходять аналогічними приведеним в таблиці 1.1.

Як і у попередньому випадку, перший корінь можна відкинути, оскільки він відповідає нульовій частоті, у зв'язку з чим $J_0(0) = 0$.

Для абсолютно жорстких стінок умова (1.21) дає систему двох рівнянь:

$$\begin{cases} Ak_z \cos(k_z 0) - Bk_z \sin(k_z 0) = 0; \\ Ak_z \cos(k_z h) - Bk_z \sin(k_z h) = 0. \end{cases}$$

В результаті рішення якої, отримуємо:

$$A = 0, k_z \cdot h = \pi \cdot m, \quad (1.23)$$

де $m = 0, 1, 2, \dots$

У результаті для власних частот повинні виконуватися умови, аналогічні (1.18), а набір власних частот для рідини в резонансній циліндричній кавітаційній камері заданих геометричних розмірів розраховується по аналогічному (1.19) рівнянню і отримані значення власних частот відповідатимуть, наведеним в таблиці 1.2.

Розглянемо випадок резонансної кавітаційної камери, закритої з одного торця абсолютно жорсткою стінкою, а з іншого торця абсолютно м'якої (рис. 1.25).

У такому випадку граничні умови мають вигляд:

$$\left. \frac{\partial \Phi(r)}{\partial r} \right|_{r=a} = 0, \quad (1.24)$$

$$\left. \frac{\partial \Phi(z)}{\partial z} \right|_{z=0} = 0, \quad \Phi(z)|_{z=h} = 0. \quad (1.25)$$

Після підстановки (1.25) в (1.12) і з врахуванням того, що $\frac{\partial J_0(x)}{\partial x} = -J_1(x)$, отримаємо:

$$J_1(k_r r) = 0. \quad (1.26)$$

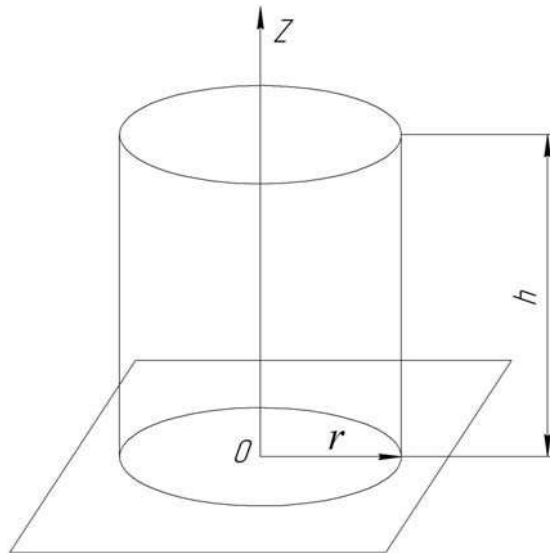


Рис. 1.25 – Схема резонансної кавітаційної камери, закритої з одного торця абсолютно жорсткою стінкою, а з іншого торця абсолютно м'якою стінкою

Значення перших десяти коренів, що задовольняють вираз (1.26), виходять аналогічними, наведеним в таблиці 1.1.

Як і в попередніх випадках, перший корінь можна відкинути, оскільки він відповідає нульовій частоті, у зв'язку з чим $J_0(0) = 0$.

Для цієї комбінації торців кавітаційної камери умова (1.25) дасть систему двох рівнянь:

$$\begin{cases} Ak_z \cos(k_z 0) - Bk_z \sin(k_z 0) = 0; \\ A \sin(k_z h) + B \cos(k_z h) = 0. \end{cases}$$

У результаті розв'язання системи, отримуємо:

$$A = 0, \quad k_z \cdot h = \frac{\pi}{2} \cdot m, \quad (1.27)$$

де $m = 0, 1, 2, \dots$

Тоді для власних частот повинні виконуватися умови:

$$\begin{cases} k_r = \frac{n_i}{a}; \\ k_z = \frac{\pi \cdot m}{2 \cdot h}; \\ k_r^2 + k_z^2 = \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot f}{c} \right)^2. \end{cases} \quad (1.28)$$

З виразу (1.28) можна знайти набір власних частот рідини, що заповнює трубчасту кавітаційну камеру заданих геометричних розмірів

$$f = \frac{c}{2 \cdot \pi} \sqrt{\left(\frac{n_i}{a} \right)^2 + \left(\frac{\pi \cdot m}{2 \cdot h} \right)^2}. \quad (1.29)$$

Результатом розв'язання рівняння (1.29) є набір власних частот рідини, що заповнює трубчасту кавітаційну камеру радіусом 31 мм, висотою 80 мм. Отримані дані наведені в таблиці 1.3. В якості рідини використовувалася вода із швидкістю звуку 1500 м/с.

Таблиця 1.3 – Набір власних частот резонансної камери

	f , кГц			
	$m=1$	$m=2$	$m=3$	$m=4$
$i=2$	29,88	30,96	32,69	34,96
$i=3$	54,23	54,84	55,83	57,19
$i=4$	78,49	78,91	79,6	80,56

1.3.3. Чисельне моделювання кавітаційної області в циліндричній камері

Отримані аналітичні вирази (1.11), (1.17), (1.18), (1.23.), (1.27) і (1.28) дозволяють візуалізувати картину виникнення і розповсюдження кавітаційних областей в об'ємі досліджуваного трубчастого вібратора [107].

Виникаючу конфігурацію кавітаційної області або звукового тиску зручно розділити на моди. При цьому номер моди складатиметься з двох чисел (табл. 1.4).

Таблиця 1.4 – Складання номера моди

		<i>m</i>			
		1	2	3	4
<i>i</i>	1	(1.1)	(1.2)	(1.3)	(1.4)
	2	(2.1)	(2.2)	(2.3)	(2.4)
	3	(3.1)	(3.2)	(3.3)	(3.4)
	4	(4.1)	(4.2)	(4.3)	(4.4)

Для випадку, коли резонансна кавітаційна камера закрита по торцях абсолютно м'якими стінками, – *i* це номер рішення рівняння (1.16), а *m* – номер рішення рівняння (1.17). У разі, коли резонансна кавітаційна камера закрита по торцях абсолютно жорсткими стінками, – *i* це номер рішення рівняння (1.22), а *m* – номер рішення рівняння (1.23). При розгляді випадку, коли резонансна кавітаційна камера закрита з одного торця абсолютно жорсткою стінкою, а з іншого торця абсолютно м'якої, – *i* це номер рішення рівняння (1.26), а *m* – відповідно номер рішення рівняння (1.27).

Найбільший інтерес представляють частоти 29,88 кГц і 30,96 кГц, як найбільш близькі до робочої частоти резонансної кавітаційної камери 22,4 кГц. Слід зазначити, що при зменшенні швидкості звуку, (що спостерігається в кавітуючій рідині) резонансна частота знижується і для режиму розвиненої кавітації (зменшення швидкості звуку приблизно 30%) складає 19,6 кГц.

Конфігурація звукового поля в резонансній кавітаційній камері, закритій з одного торця абсолютно жорсткою стінкою, а з іншого торця

абсолютно м'якої, представлена на рис. 1.26 і рис. 1.27 з урахуванням різних мод коливань.

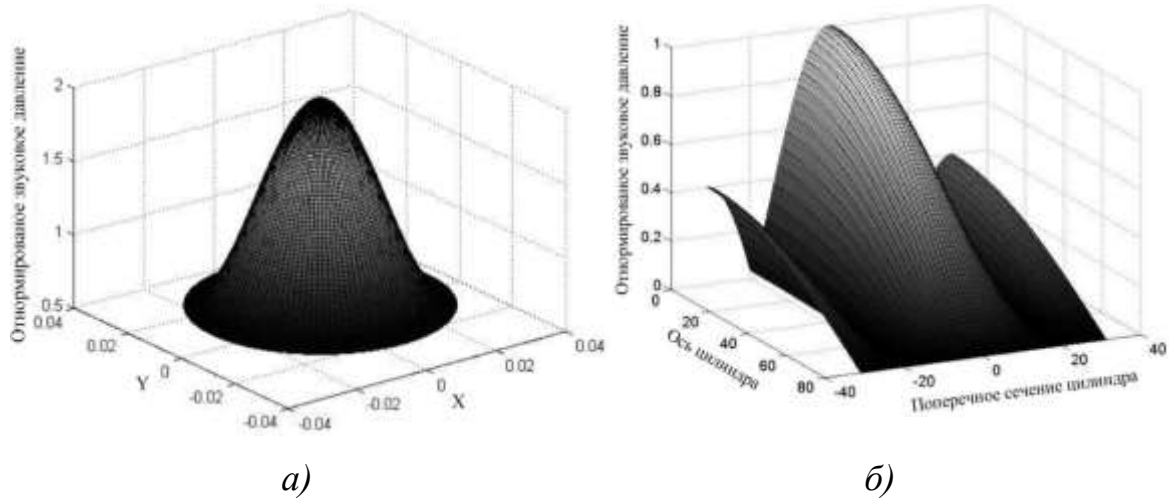


Рис. 1.26 – Конфігурація звукового поля моди (2.1) в проточній камері з циліндричним вібратором (а - в площині перпендикулярній осі; б - в площині паралельній осі)

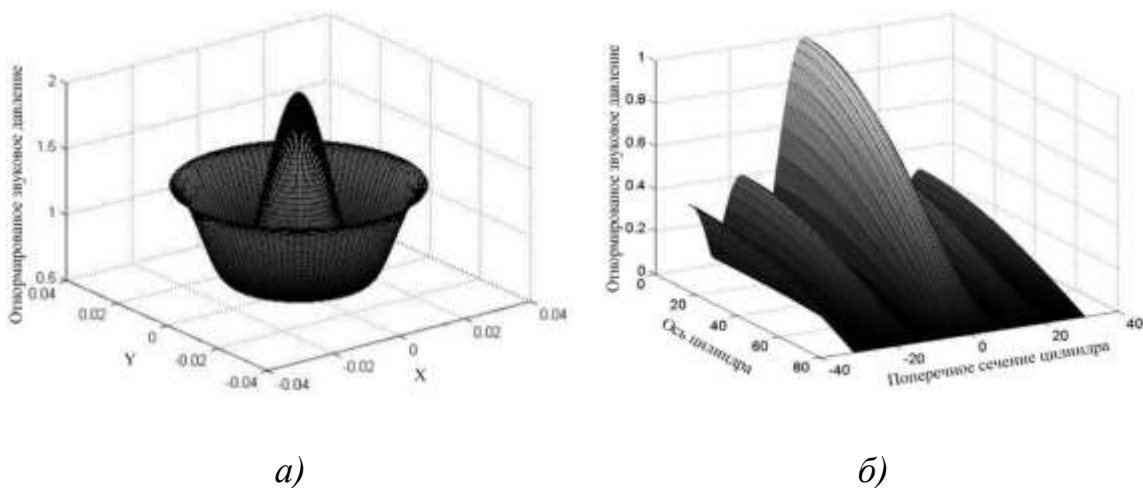


Рис. 1.27 – Конфігурація звукового поля моди (3.1) в проточній камері з циліндричним вібратором (а - в площині перпендикулярній осі; б - в площині паралельній осі)

Конфігурація звукового поля в резонансній кавітаційній камері, закритій по торцях абсолютно жорсткими або м'якими стінками буде однаковою, це представлено на рис. 1.28 та рис. 1.29 з урахуванням різних мод коливань.

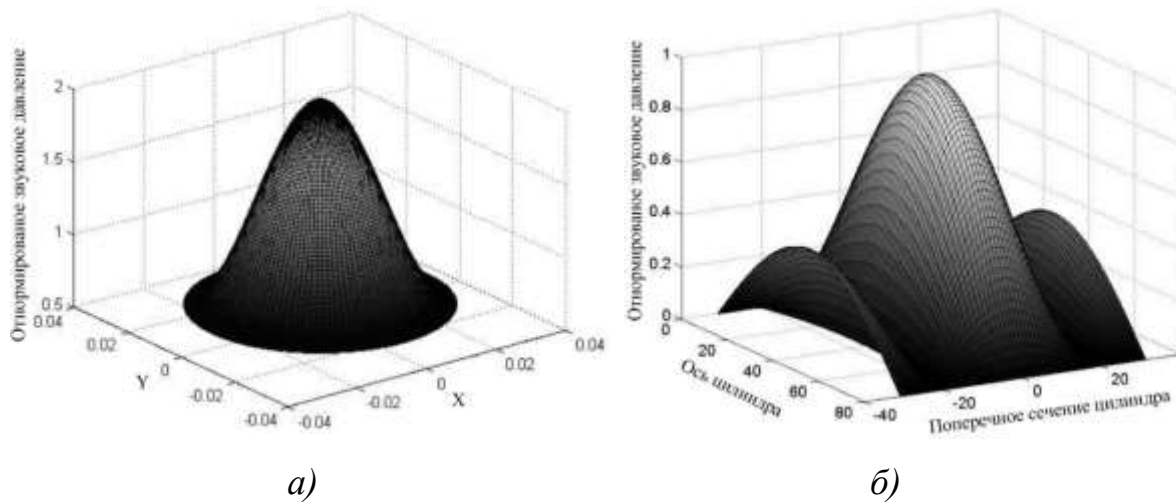


Рис. 1.28 – Конфігурація звукового поля моди (2.1) в проточній камері з циліндричним вібратором (а - в площині перпендикулярній осі; б - в площині паралельній осі)

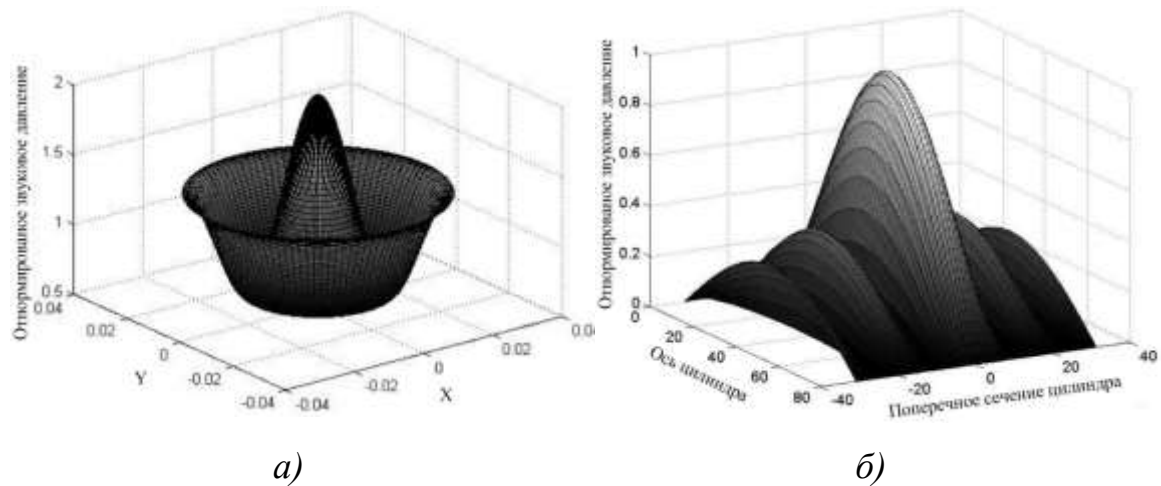


Рис. 1.29 – Конфігурація звукового поля моди (3.1) в проточній камері з циліндричним вібратором (а - в площині перпендикулярній осі; б - в площині паралельній осі)

У зв'язку з тим, що інтенсивність кавітаційних явищ залежить від величини звукового тиску, визначати конфігурацію кавітаційної області зручно застосовуючи січні площини. Це проілюстровано на прикладі резонансної кавітаційної камери, закритої по торцях абсолютно м'якими стінками (рис. 1.30).

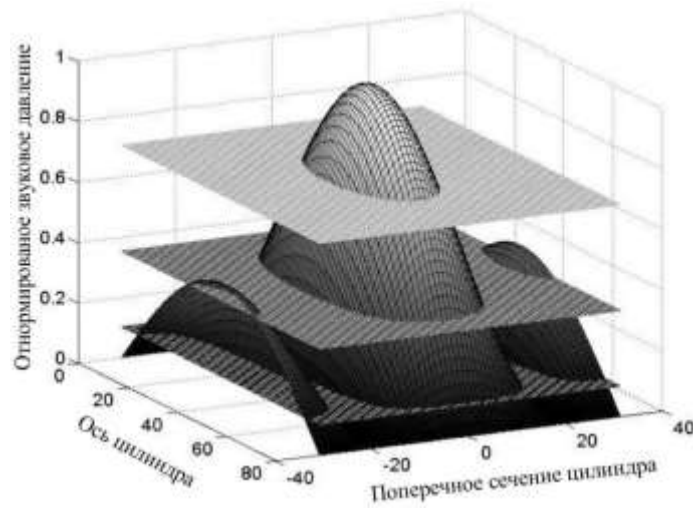


Рис. 1.30 – Січні площини для моди (2.1), які ілюструють інтенсивність кавітаційних явищ

Перетин січної площини і тривимірного графіка звукового тиску дає можливість візуалізувати конфігурацію інтенсивності кавітаційних явищ в площині із заданим рівнем звукового тиску (рис. 1.31), що цікавить нас.

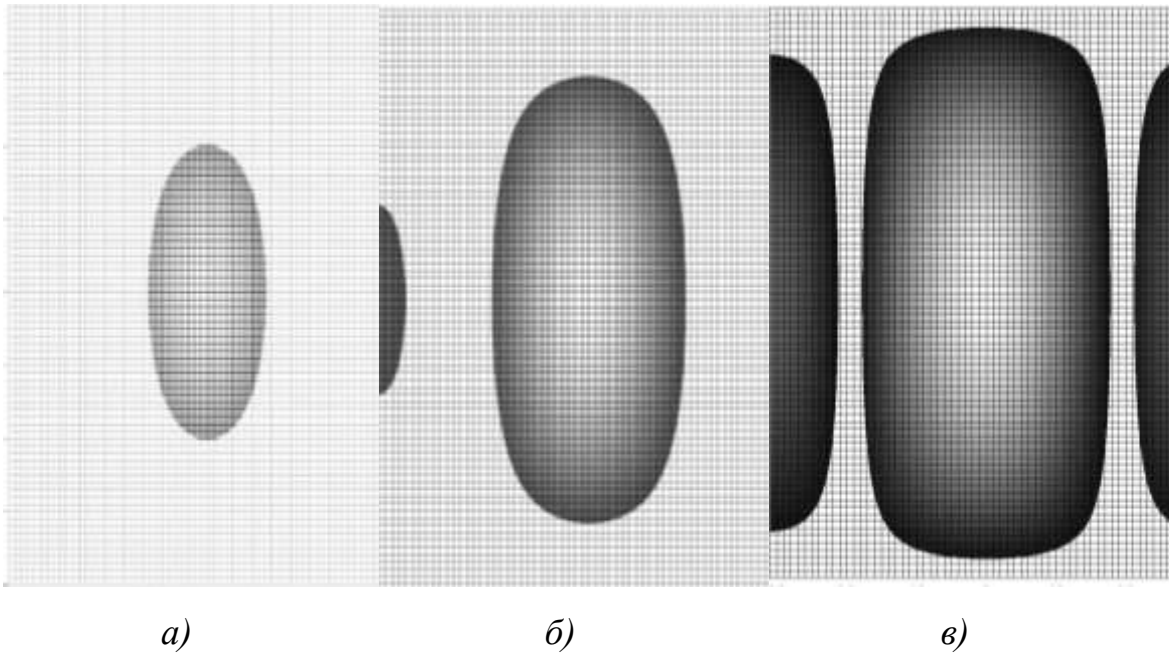


Рис. 1.31 – Розрахункові дані конфігурації кавітаційної області січними площинами при різних рівнях віднормованого звукового тиску ($a - \bar{P} = 0,7$, $b - \bar{P} = 0,38$, $v - \bar{P} = 0,1$.)

При цьому віднормоване значення звукового тиску отримані відповідно до рівняння:

$$\bar{p} = \frac{p}{P_{\max}}.$$

Розподіл звукового тиску вздовж осі кавітаційної камери нерівномірний, оскільки частина енергії витрачається на подолання сил в'язкого тертя, а частина поглинається і розсіюється кавітаційними бульбашками. Увівши в рівняння потенціалу швидкості (1.11) відповідний множник, отримаємо рівняння виду:

$$\Phi(r, z, t) = J_0(k_r r) \cdot (A \cdot \sin(k_z z) + B \cdot \cos(k_z z)) \cdot e^{-\delta \cdot z} \cdot \sin(\omega t) \dots (1.30)$$

де δ – декремент затухання.

1.3.4. Чисельне моделювання кавітаційної області в підвідних каналах кавітаційної камери

Зважаючи на рівняння (1.30) і граничні умови (1.17), (1.18), побудуємо графіки поширення рівня звукового тиску вздовж осі кавітаційної камери для мод коливань (2.1) (рис. 1.32) та (3.1) (рис. 1.33), коли резонансна кавітаційна камера закрита по торцях абсолютно м'якими стінками.

Як і в попередньому випадку, зважаючи на рівняння (1.30) і граничні умови (1.27), (1.28), побудуємо графіки поширення рівня звукового тиску вздовж осі кавітаційної камери для мод коливань (2.1) (рис. 1.34) та (3.1) (рис. 1.35), коли резонансна кавітаційна камера закрита з одного торця абсолютно жорсткою стінкою, а з іншого торця абсолютно м'якою стінкою.

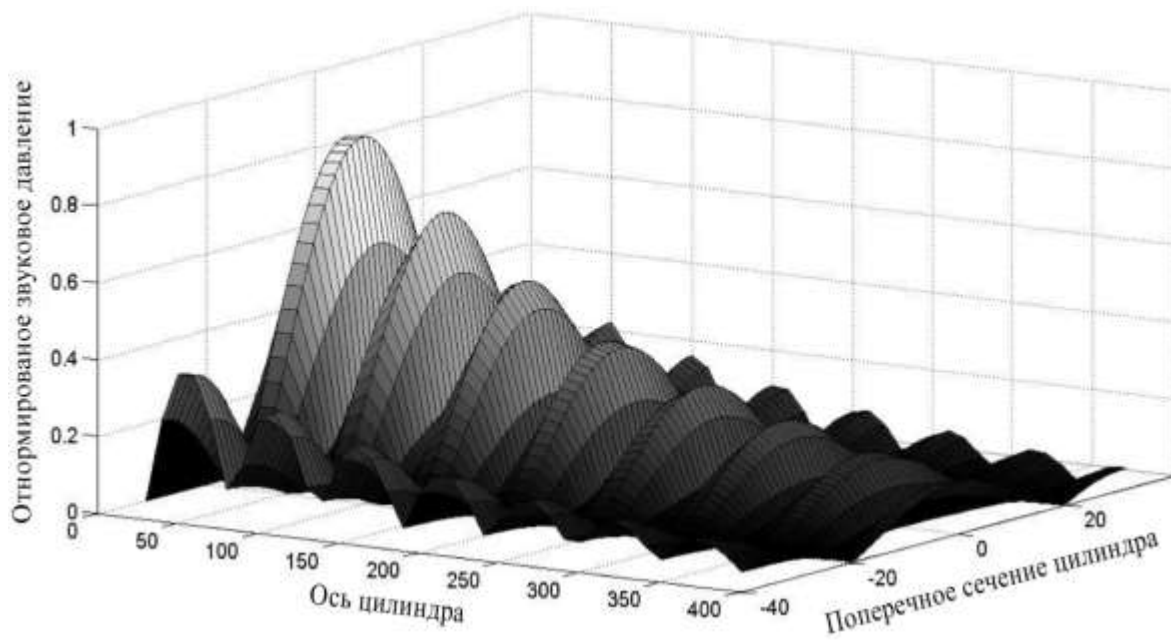


Рис. 1.32 – Конфігурація звукового поля в проточній камері з циліндричним вібратором (торці закриті абсолютно м'якими кришками), мода (2.1)

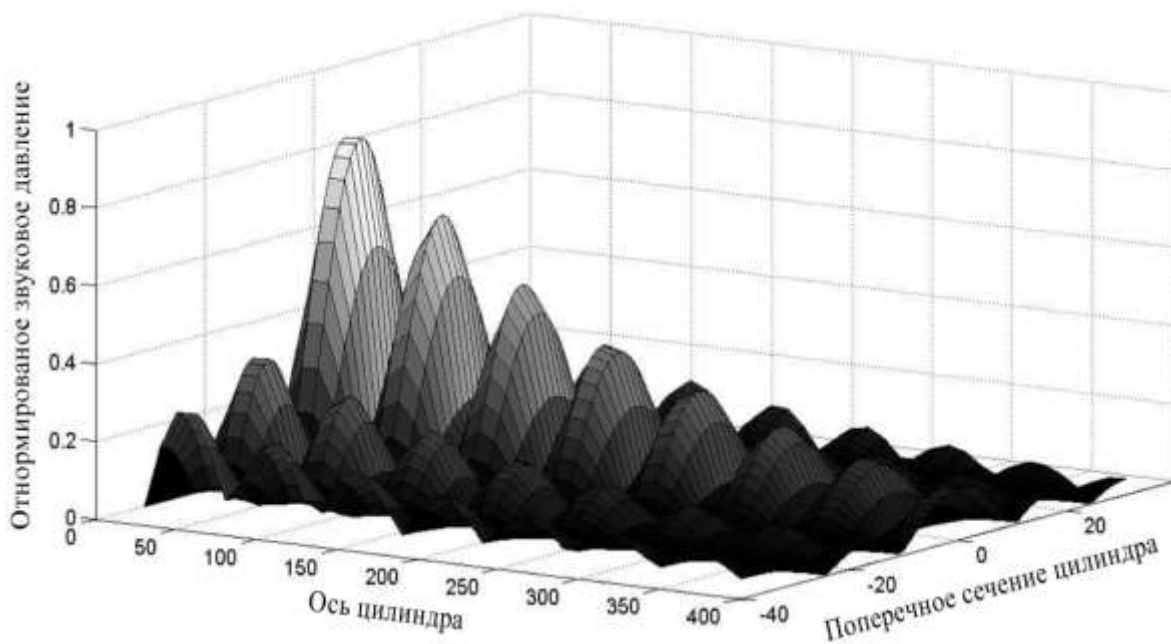


Рис. 1.33 – Конфігурація звукового поля в проточній камері з циліндричним вібратором (торці закриті абсолютно м'якими кришками), мода (3.1)

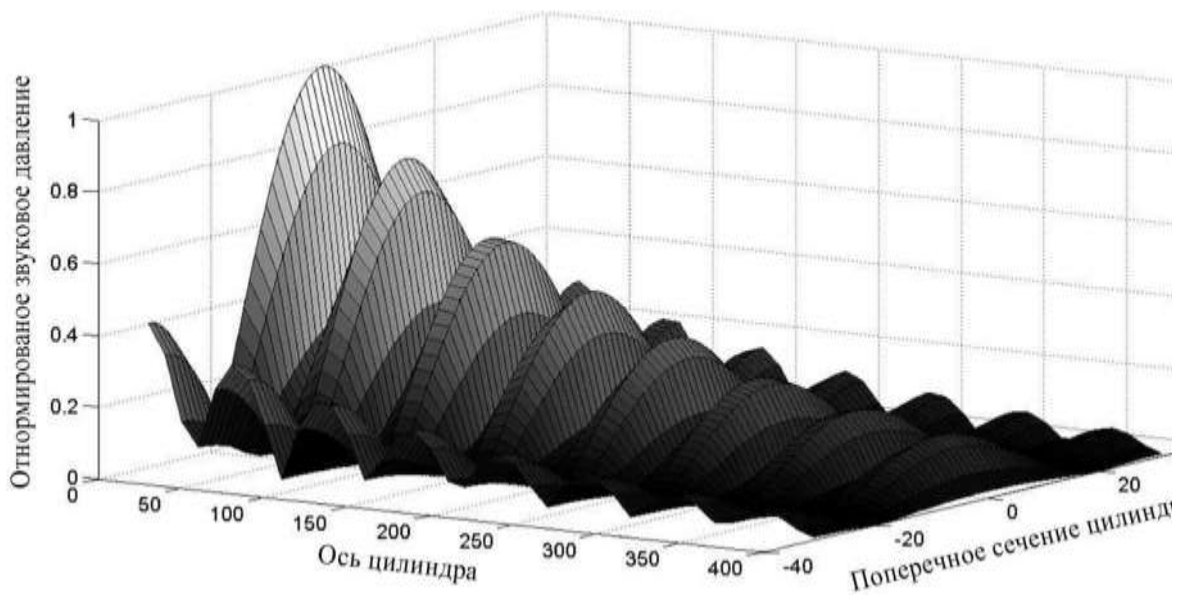


Рис. 1.34 – Конфігурація звукового поля в проточній камері з циліндричним вібратором (один торець закритий абсолютно м'якою стінкою, а другий - абсолютно жорсткою стінкою), мода (2.1)

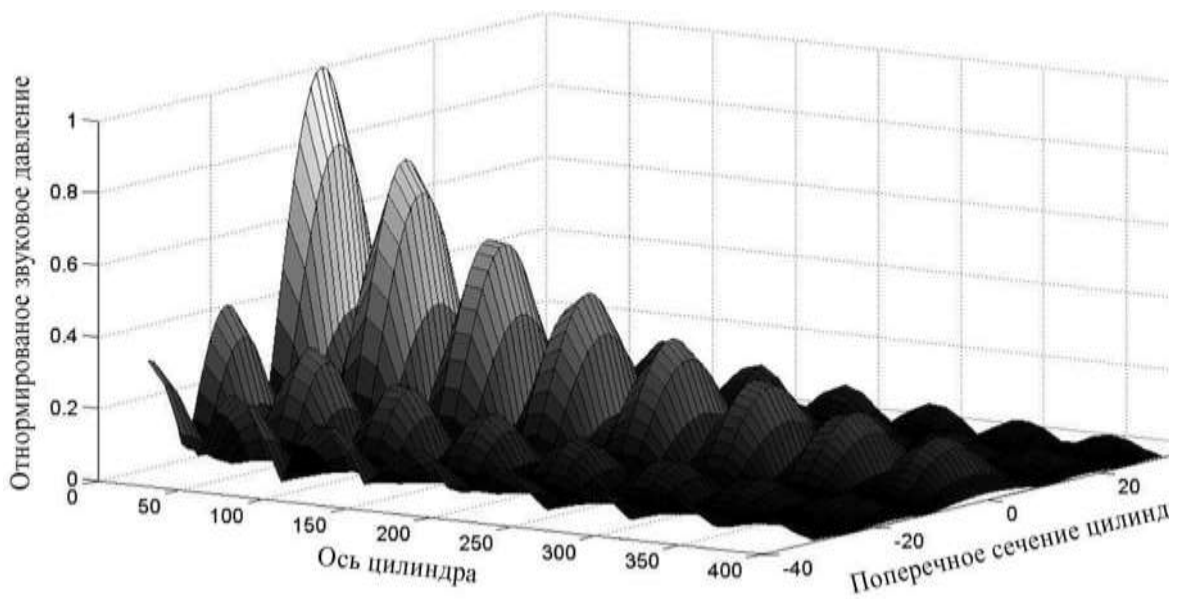


Рис. 1.35 – Конфігурація звукового поля в проточній камері з циліндричним вібратором (один торець закритий абсолютно м'якою стінкою, а другий - абсолютно жорсткою стінкою), мода (3.1)

Отримані графічні залежності дозволяють виявити розташування в кавітаційній камері областей максимальної інтенсивності кавітації і, тим

самим, сформулювати рекомендації для проектувальників ультразвукового технологічного обладнання, в основі якого лежить трубчастий резонансний вібратор:

- необхідно конструктивно забезпечити рух оброблюваної рідини в області центральної осі вібратора, по можливості зупинивши рух рідини вздовж стінок вібратора;

- надмірне збільшення амплітуди коливань трубчастого вібратора призводить до розширення кавітаційної зони від центральної осі до стінок, що призводить до можливості кавітаційної ерозії внутрішньої поверхні кавітаційної камери;

- підвідний та відвідний трубопроводи трубчастого кавітаційного технологічного обладнання повинні бути виготовлені із кавітаційно стійкого матеріалу довжиною не менше 0,4 м.

Для підтвердження результатів аналітичного дослідження необхідно скористатися запропонованими методиками розрахунку ультразвукових кавітаторів високої інтенсивності, виготовити зразки запропонованого кавітаційного обладнання і провести експериментальні дослідження особливостей виникнення і розвитку кавітаційних областей.

1.4. Експериментальне дослідження роботи проточного кавітатора з високою інтенсивністю ультразвуку для обробки рідких середовищ

Ефективність ультразвукового кавітаційного обладнання в значній мірі залежить від раціональної організації звукового поля в технологічному об'ємі кавітаційної камери, від ефективності введення в рідину ультразвукових коливань, від досягнутого рівня інтенсивності ультразвукових коливань в заданій області кавітаційної камери [108], а також від розташування в технологічному об'ємі виробу, що очищається,

[109] або організації руху оброблюваного потоку рідини через зони з максимальною інтенсивністю кавітації. Врахування зазначених факторів дозволяє досягти високої ефективності кавітаційних технологічних процесів і забезпечити довговічність обладнання в умовах інтенсивної кавітаційної ерозії твердих поверхонь.

Забезпечити досягнення подібних результатів дозволяє застосування трубчастої циліндричної кавітаційної камери. Результати аналітичного дослідження процесу її функціонування наведені в третьому розділі.

Для підтвердження адекватності запропонованої математичної моделі й отриманих результатів аналітичного дослідження розроблені експериментальні установки і проведено експериментальне дослідження процесу одержання в рідкому середовищі високоінтенсивної ультразвукової кавітації.

1.4.1. Експериментальне дослідження роботи ультразвукового трубчастого кавітатора в режимі радіальних коливань

Для експериментального дослідження ультразвукових кавітаторів, здатних створювати в рідині високий рівень інтенсивності звуку, була обрана акустична схема, у якій ультразвукові коливання вводяться в рідину з невисокою інтенсивністю, а потім у рідині здійснюється їх концентрація в заданій області [110]. При цьому кавітаційні явища виникають тільки в цій області, а підведення ультразвукової енергії до цієї області здійснюється в докавітаційному режимі з високим ККД.

Експериментально був досліджений трубчастий кавітатор, збуджуваний на нульовій моді коливань, тобто такий, що здійснює чисто радіальні коливання. Збудження коливань трубчастого кавітатора здійснювалося за допомогою чотирьох п'єзоелектричних приводів

осьових переміщень зі ступінчастими трансформаторами коливальної швидкості. Приводи, що забезпечують підвід до трубчастого вібратора ультразвукової енергії, встановлені на зовнішній циліндричній поверхні вібратора. Для зменшення спотворень форми коливань вібратора при зовнішньому підведенні ультразвукової енергії, секції меншої площі трансформаторів коливальної швидкості виконані ножевидними і розташовані вздовж зовнішньої твірної циліндричної поверхні вібратора (рис. 1.36) [98].

Вібратор, що здійснює подібні коливання, забезпечує фокусування ультразвукових коливань в області поздовжньої осі трубчастого профілю. Для виключення радіально-згинних хвиль уздовж поверхні трубчастого профілю його довжину вибирають менше половини довжини хвилі цих коливань.



Рис. 1.36 – Ультразвуковий трубчастий кавітатор з радіальною модою коливань

Дослідження проводилися на експериментальній установці, що представляє собою трубчастий вібратор з встановленими знімними прозорими торцевими кришками (рис. 1.37).



Рис. 1.37 – Експериментальна установка для дослідження роботи ультразвукового трубчастого вібратора

Живлення п'єзоелектричних приводів здійснювалось від потужного електричного генератора змінної напруги. [111] Цей генератор разом з п'єзоелектричними приводами трубчастого вібратора складає мехатронну систему (рис. 1.38). Електричні коливання формуються задаючим генератором, підсилюються підсилювачем потужності, що містить також кола узгодження для передавання енергії до п'єзоелектричних приводів з мінімальними втратами. Оскільки п'єзоелектричні приводи-випромінювачі є резонансними системами, то для підтримання заданого рівня споживаної потужності і постійного значення резонансної частоти в електричних генераторах вводяться зворотні зв'язки за підведеними до привода струмом і напругою [111].

Сигнали зворотного зв'язку обробляються схемами автопідстроювання частоти, схемами стабілізації потужності та електричного захисту, що є складовими частинами задаючого генератора. Джерело живлення створює необхідні для функціонування системи значення напруг.

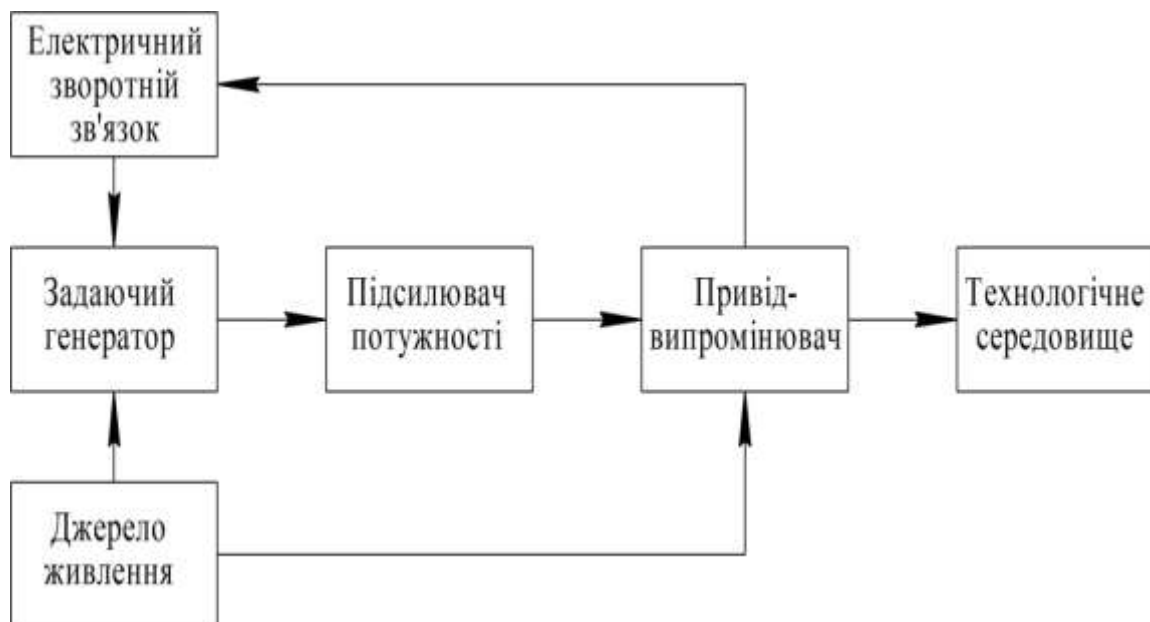
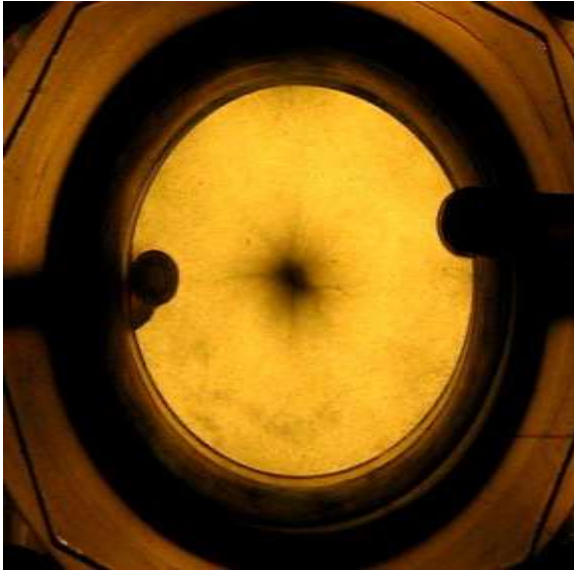


Рис. 1.38 – Структурна схема ультразвукового кавітаційного обладнання

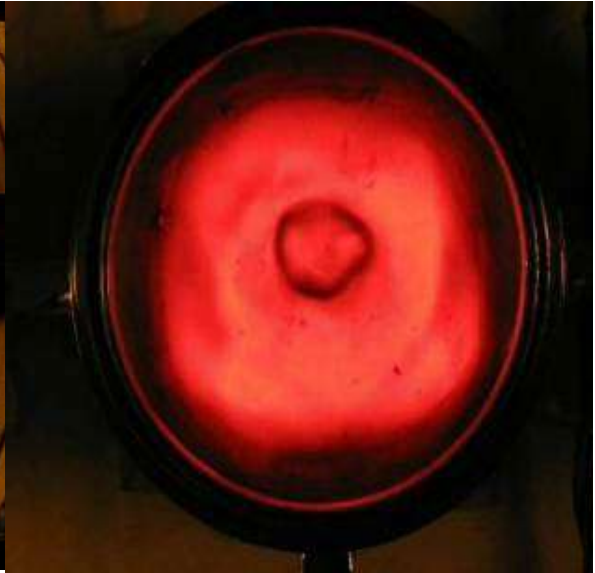
Експериментальні дослідження підтвердили ефект концентрації ультразвукової енергії в області поздовжньої осі камери при здійсненні радіальних коливань (рис. 1.39) [112].

При встановлених двох прозорих торцевих кришок можна було спостерігати утворення у центральній частині вібратора інтенсивної кавітаційної області (рис. 1.39а).

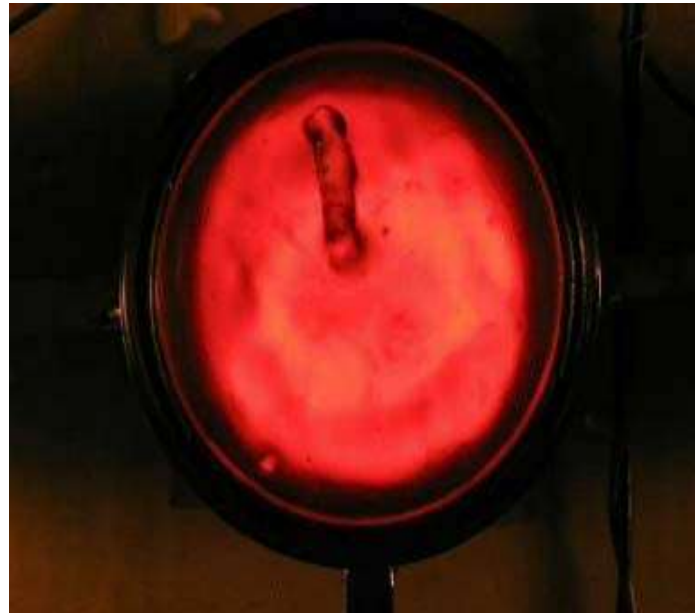
При знятті однієї торцевої кришки на вільній поверхні води спостерігалось утворення за рахунок радіаційного тиску бугра рідини (рис. 1.39б). При подальшому збільшенні підведеної енергії бугор вироджувався в стовпчик рідини (рис. 1.39в).



a)



б)



в)

*Рис. 1.39 – Візуально спостережуваний ефект концентрації
ультразвукової енергії в циліндричній кавітаційній камері з
радіальними коливаннями різної інтенсивності (а – малий рівень, б –
середній рівень, в – високий рівень.)*

1.4.2. Дослідження інтенсивності кавітаційних явищ всередині кавітатора методом ерозійних тестів

Для оцінки ефективності кавітації в експериментальних дослідженнях використовувався метод ерозійних тестів [102, 112, 113], що дозволяє по площі ерозійного руйнування алюмінієвої фольги за фіксований час міркувати про інтенсивність кавітації і про розміри і форму кавітаційної області.

Для експериментального дослідження інтенсивності кавітаційних явищ усередині циліндричного вібратора відповідно до методу ерозійних тестів використовувалась алюмінієва фольга, яка розташовувалась уздовж осі вібратора (рис. 1.40).

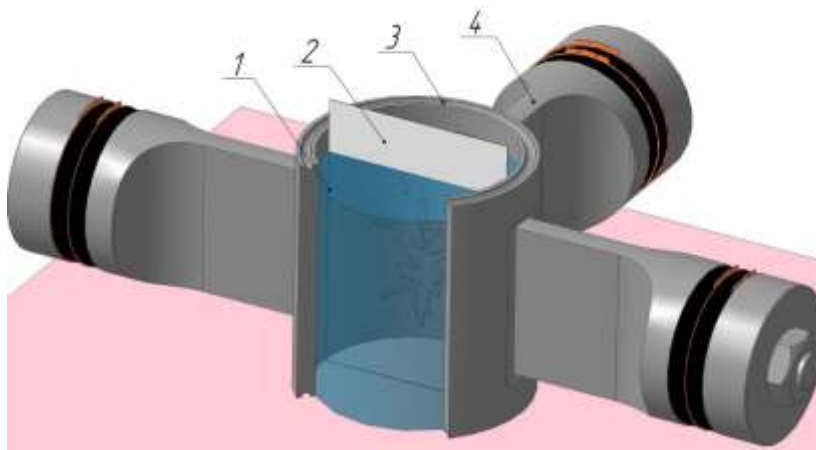


Рис. 1.40 – Схема розміщення контрольних зразків фольги в кавітаційній камері (1- вода, 2 – фольга, 3 – трубчастий вібратор, 4 – випромінювач.)

Це дослідження проводилося для випадку, коли кавітаційна резонансна камера була закрита кришкою тільки з одного торця, що відповідає розглянутому при аналітичному дослідженні, випадку наявності однієї абсолютно твердої і однієї абсолютно м'якої стінки. Цей варіант виконання кавітаційної камери забезпечує легкість доступу до тестових зразків фольги й простоту візуального спостереження за

процесом ерозійного руйнування зразків.

При малій амплітуді радіальних коливань вібратора, тобто малій інтенсивності ультразвуку, в центральній частині циліндричної кавітаційної камери утворюється невелика кавітаційна область, що виникає за рахунок фокусуєчих властивостей внутрішньої циліндричної поверхні (рис. 1.41а).

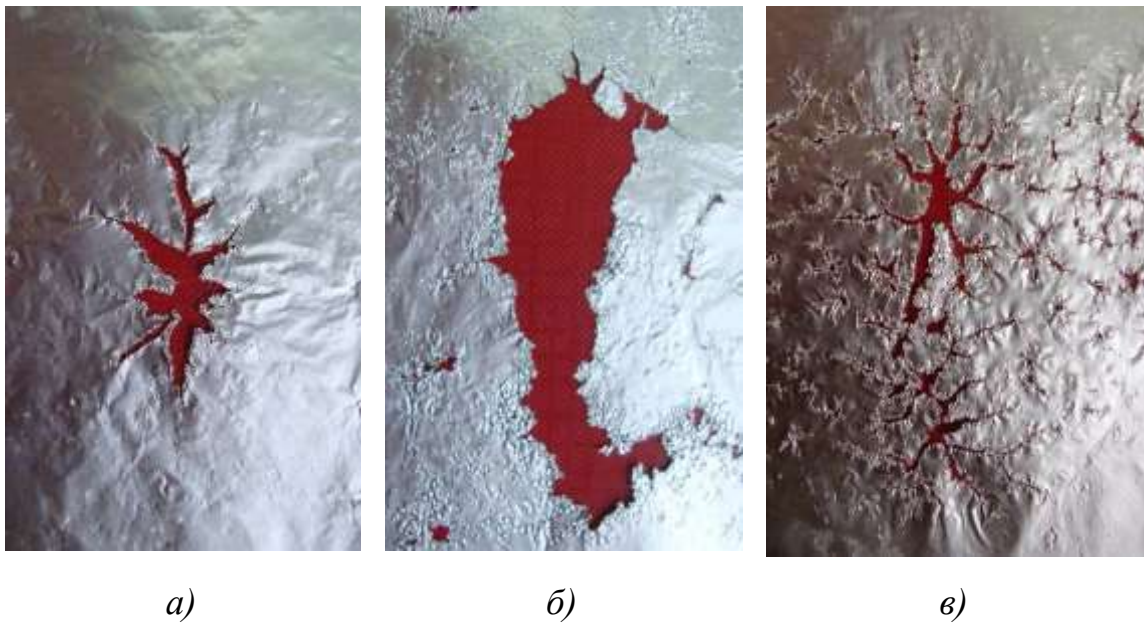


Рис. 1.41 – Результати руйнування тестових зразків тестової фольги в трубчатому вібраторі при різних рівнях звукового тиску (а – малий рівень, б – середній рівень, в – високий рівень.)

При підвищенні інтенсивності коливань за рахунок підвищення напруги збудження резонансних п'єзоелектричних приводів кавітаційна область поступово розширюється. Ерозійна активність у кавітаційній області суттєво зростає (рис. 1.41б). Інтенсивність звуку в області осьової лінії при цьому досягає 100 Вт/см^2 . Подальше підвищення амплітуди коливань призводить до того, що кавітаційна область розширюється до внутрішньої поверхні циліндричної камери (рис. 1.41в). При цьому через

двофазне середовище, що наблизилось до випромінюючої поверхні, суттєво погіршуються умови введення ультразвуку в рідину і ефективність кавітатора різко падає [114]. Результати дослідження методом ерозійних тестів підтверджують ефект концентрації звукової енергії в області осі трубчастого вібратора при збудженні в ній радіальних коливань. На стінках кавітатора при цьому кавітаційних явищ не спостерігається, що підтверджує аналітичні дослідження [102, 107].

Кількісно ступінь руйнування фольги оцінювався коефіцієнтом ерозійної активності [115]:

$$K_{ep} = \frac{S_p}{S} \cdot 100\%,$$

де S_p – площа руйнувань фольги під дією кавітації; S – початкова площа зразка фольги.

Усереднені значення коефіцієнта ерозійної активності для чотирьох рівнів підведеної до кавітатора електричної потужності показана на рис. 1.42.

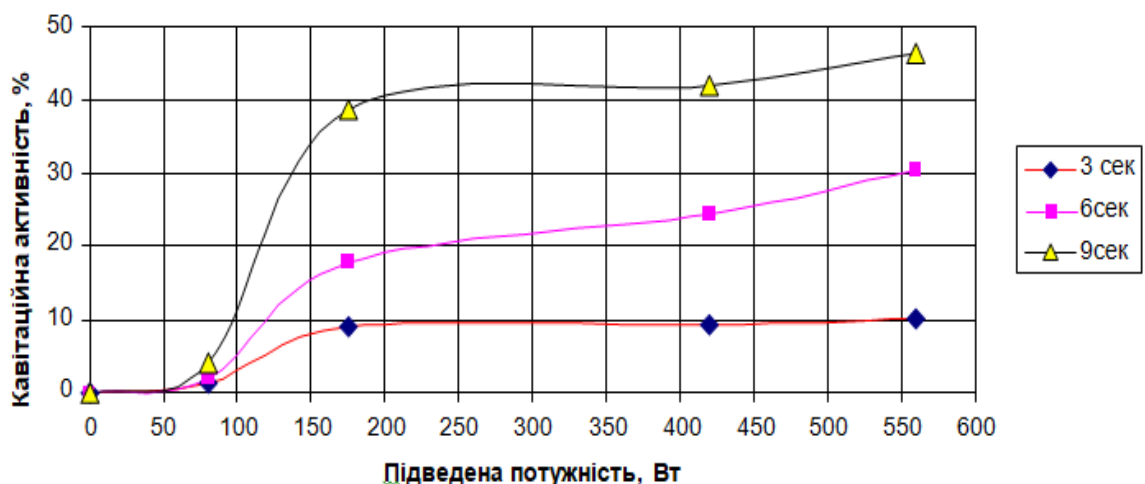


Рис. 1.42 – Залежність кавітаційної активності від величини підведеної потужності

Час обробки зразків складав 3 с, 6 с та 9 с. З рисунка видно, що площа руйнування фольги збільшувалась при збільшенні підведеної потужності, але ця залежність нелінійна і прямує до насичення.

1.4.3. Дослідження інтенсивності кавітаційних явищ усередині кавітатора акустичним методом

Методи ерозійних тестів володіють рядом недоліків. Зокрема фіксують витрату енергії тільки в тих місцях зразків, у яких утворилися наскрізні отвори, спотворюють конфігурацію поля в кавітаційній камері. [116] Тому для підвищення надійності отриманих експериментальних результатів було досліджено роботу ультразвукового трубчастого вібратора акустичним методом, який базується на реєстрації за допомогою датчика акустичного тиску та обробці акустичного сигналу, що утворюється звуковою хвилею і ударними хвилями від захопування кавітаційних бульбашок. За допомогою акустичного методу, зокрема може бути визначено коефіцієнт використання акустичної енергії в певній точці технологічного об'єму. Цей коефіцієнт, запропонований в роботі [117], дозволяє оцінити інтенсивність кавітаційних процесів.

$$\chi = \frac{E_k}{E}$$

де χ – коефіцієнт використання акустичної енергії; E – щільність підведеної первинної енергії; E_k – щільність енергії, затраченої на утворення кавітації.

Як відомо, на утворення і зростання кавітаційних бульбашок витрачається частина енергії звукового поля, яка потім вивільняється при захопуванні кавітаційних бульбашок [117]. Частота коливань звукового поля, яке є причиною кавітації, відповідає частоті першої гармоніки

спектру акустичного сигналу, прийнятого гідрофоном. Ударні хвилі сприймаються як імпульси і в спектрі представлені частково першою та вищими гармоніками. Таким чином, є можливість за допомогою коефіцієнту використання акустичної енергії визначити частину енергії, яка пішла на утворення кавітації.

У такому випадку коефіцієнт використання акустичної енергії доцільно представити як відношення потужності гармонік, крім першої, до сумарної потужності всіх складових спектру [116]:

$$\chi = \frac{N_k}{N} = \frac{N_\Sigma - N_1}{N_\Sigma} = \frac{\sum_{i=1}^n U_i^2 - U_1^2}{\sum_{i=1}^n U_i^2},$$

де N_k – потужність, витрачена на кавітацію; N_Σ – сумарна потужність всіх спектральних складових; N_1 – потужність першої гармоніки; U_i , U_1 – амплітуди, відповідно, i -тої та першої гармонік.

Для проведення вимірювань експериментальна установка (рис. 1.37) була доповнена датчиком акустичного тиску [118] з механізмом його позиціонування. Принцип роботи датчика акустичного тиску базується на прямому п'єзоефекті. Основу конструкції складає п'єзокерамічний елемент з двома металевими обкладинками. Під дією тиску на обкладинках з'являється різниця потенціалів, пропорційна прикладеному тиску.[119] Сигнал з датчика акустичного тиску підсилювався диференціальним підсилювачем та передавався на плату збору даних L-CARD L-783M, встановлену на персональний комп'ютер.

Вимірювання проводились в шести точках вздовж діаметра, що проходить через центр кавітаційної камери в площині розміщення зразків фольги. Відстань між точками 10 мм.

Було визначено коефіцієнт використання акустичної енергії, приблизний діаметр кавітаційної області. Результати для чотирьох рівнів

підведеної до кавітатора електричної потужності наведено на рисунку 1.43.

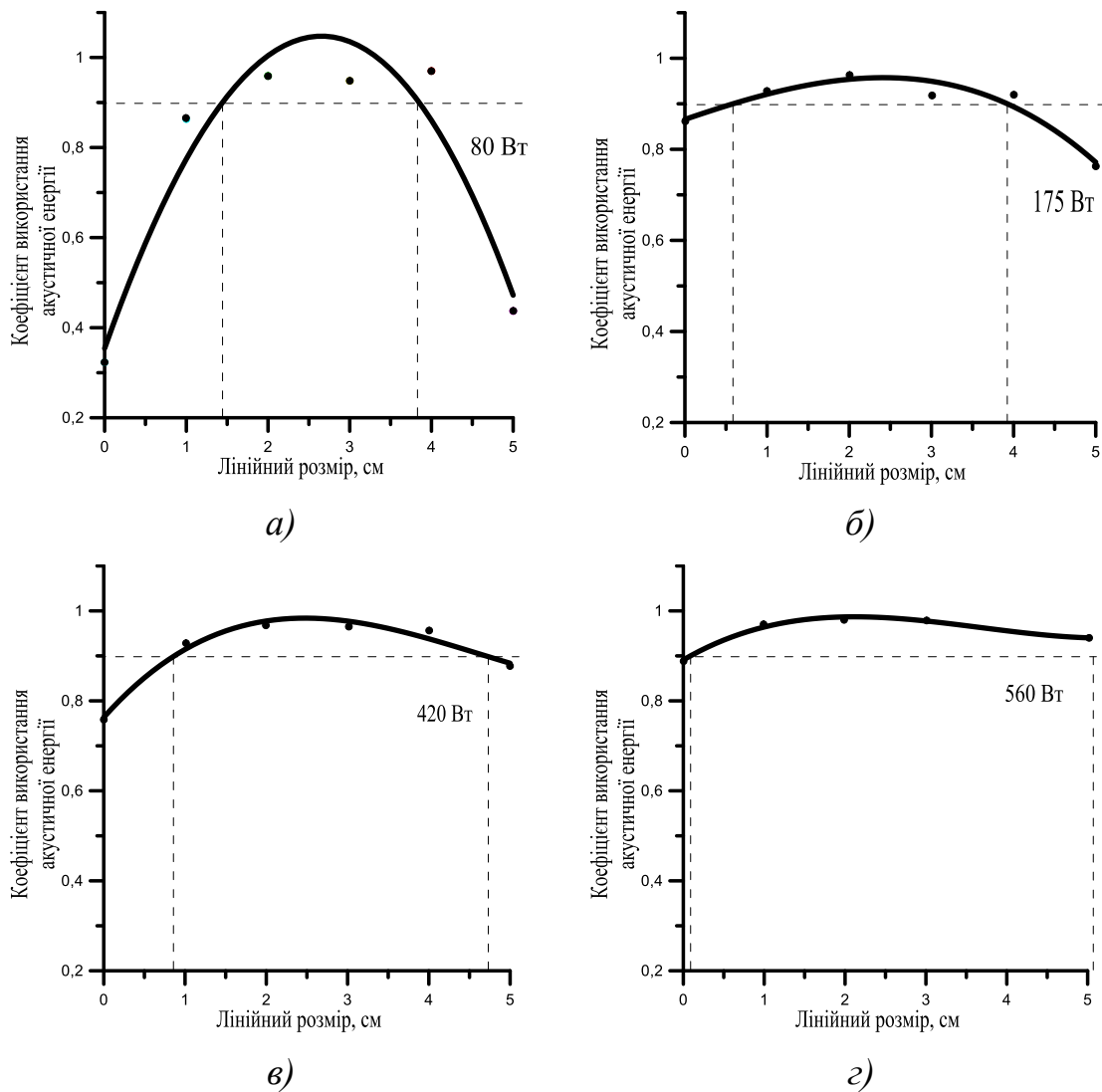


Рис. 1.43 – Залежності коефіцієнта ерозійної активності від координати, вздовж діаметра в центрі кавітаційної камери для різних потужностей (а – 80 Вт; б – 175 Вт; в – 420 Вт; г – 560 Вт.)

На рис. 1.43 суцільною лінією показано апроксимацію експериментальних даних поліномом третього ступеня за методом найменших квадратів.

З представлених рисунків (рис. 1.43) видно, що в центрі кавітаційної

камери максимальна інтенсивність кавітаційних процесів. Визначення діаметра кавітаційної області проведено за апроксимаційною кривою, задаючись умовою, що границя цієї області проходить там, де коефіцієнт використання акустичної енергії дорівнює 0,9. Обробка отриманих даних наведеного експериментального дослідження дозволила зробити висновок, що кавітаційна область розширюється при збільшенні підведеної електричної потужності і на рівні 560 Вт вона заповнює майже весь об'єм камери. Дані експерименту зведені в таблицю 1.5.

Таблиця 1.5 – Оцінка діаметру кавітаційної області

Підведена електрична	Діаметр кавітаційної області
80 Вт	24 мм
175 Вт	33 мм
420 Вт	38 мм
560 Вт	49 мм

Дані результати узгоджуються з результатами, які були отримані при застосуванні методу ерозійних тестів та підтверджують результати аналітичного дослідження [107].

Виготовлене експериментальне обладнання на базі трубчатого ультразвукового кавітатора з високою інтенсивністю ультразвуку розраховане для кавітаційної обробки води. Проте часто доводиться піддавати кавітаційній обробці й інші рідини. Для отримання максимального ефекту для кожної рідини необхідно виготовляти свою конструкцію зі своїми резонансними розмірами.

Провівши цілий ряд експериментів на вже виготовленому нами кавітаційному обладнанні з різними типами рідин, які мають різні реологічні властивості, було встановлено, що застосувати це обладнання для кавітаційної обробки різних рідин можливо, але ефективність

обробки, звичайно, буде меншою (рис. 1.44). За параметр яких характеризує тип рідини було вибрано швидкість розповсюдження звуку в цій рідині. Цей параметр був вибраний не випадково, адже в літературі існує безліч табличних значень, у яких вказано тип рідини і відповідне значення швидкості розповсюдження звуку в цій рідині.

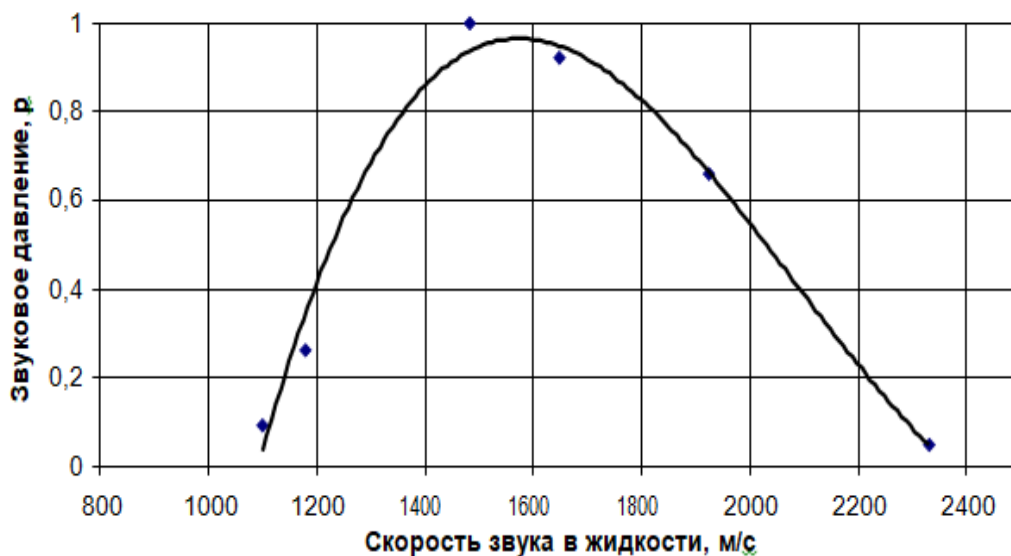


Рис. 1.44 – Прогнозування роботи ультразвукового трубчастого кавітатора з різними типами рідин

На графіку спостерігається падіння ефективності кавітаційних процесів в відсотковому співвідношенні залежно від типу рідини.

1.4.4. Експериментальне дослідження розповсюдження ультразвукової кавітації вздовж підвідних трубопроводів

Як показали аналітичні дослідження, ультразвукові коливання, що концентруються в області поздовжньої осі трубчастого вібратора, будуть генератором коливань, що поширюються вздовж поздовжньої осі камери.

Для підтвердження отриманих результатів аналітичного дослідження була створена експериментальна установка (рис. 1.45а).



а)

б)



в)

Рис. 1.45 – Експериментальна установка для дослідження поширення ультразвукової кавітації вздовж трубопроводу (а - загальний вид обладнання, б - розташування індикаторної фольги вздовж трубопроводу, в - область кавітаційного руйнування індикаторної фольги.)

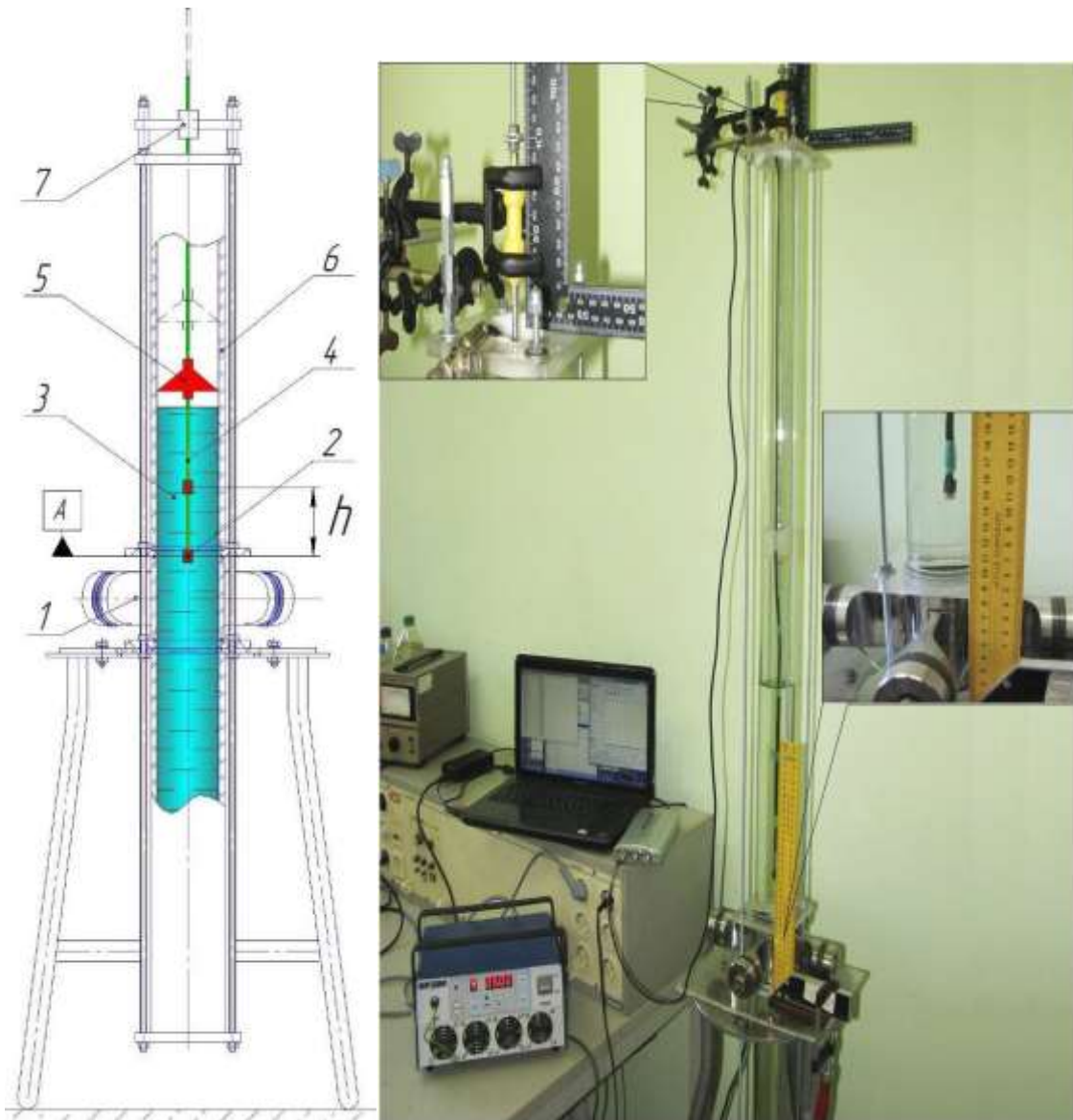
У якій трубчастий вібратор радіальних коливань був оснащений скляними торцевими кришками, до яких були пристиковані скляні труби метрової довжини [120]. Діаметр труб відповідав діаметру вібратора. Через труби було організовано безперервний потік води, що забезпечує термостабілізацію [121] кавітатора і подачу в кавітаційну зону свіжих зародків кавітації. Вздовж усієї довжини осі установки була розміщена тестова алюмінієва фольга в спеціальній рамці (рис. 1.45б). Подібна конструкція стенда дозволяла візуально контролювати процес ерозійного руйнування фольги (рис. 1.45в).

Експериментальне дослідження поширення ультразвукового поля вздовж осі трубопроводу показало досить швидке загасання поля від трубчастого вібратора радіальних коливань до рівня нижче порога кавітації (рис. 1.45в) [122].

Для більш точного експериментального дослідження розподілу звукового поля по підвідним та відвідним трубопроводам, що значно впливає на довговічність роботи кавітаційного обладнання, експериментальна установка була дооснащена п'єзоелектричним датчиком тиску і механізмом його осьового переміщення датчика (рис. 1.46) [123]. Конструкція установки дозволяла розглянути різні граничні умови, накладені при моделюванні, а система напрямних дозволила позиціонувати п'єзоелектричний датчик вздовж осі камери на будь-якій відстані від досліджуваного кільцевого вібратора. Форма і розміри датчика тиску дозволяли мінімізувати спотворення, внесені ним в конфігурацію ультразвукового поля.

У процесі роботи системи її резонансна частота може значно змінюватись в ту чи іншу сторону. У зв'язку із цим при знятті показань брався інтервал частот поблизу резонансної частоти 22.4 кГц. Для одного

положення датчика записувалося п'ять спектрів частот, що дозволяло одержати усереднені значення. Результати представлені на рис. 1.47.



*Рис.1. 46 – Схема і зовнішній вигляд експериментальної установки.
(1 – випромінювач, 2 – п'єзоелектричний датчик, 3– робоче середовище, 4 – стрижень, 5 – рухлива напрямна, 6 – скляна труба, 7 – нерухлива напрямна.)*

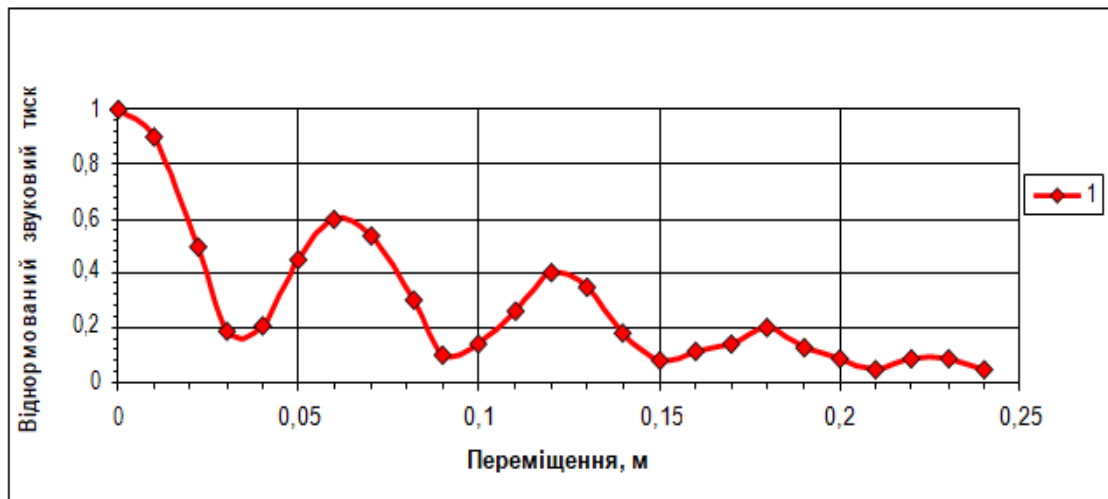


Рис. 1.47 – Рівень звукового тиску вздовж осі камери

Експериментально підтверджено, що тривала робота кільцевого вібратора може призвести до поступового ерозійного руйнування підвідних та відвідних трубопроводів на ділянці довжиною до 400 мм. Тому розробникам технологічного обладнання можна рекомендувати виконувати ці ділянки з кавітаційностійких матеріалів, наприклад, нержавіючої сталі 12Х18Н10Т (рис. 1.48).

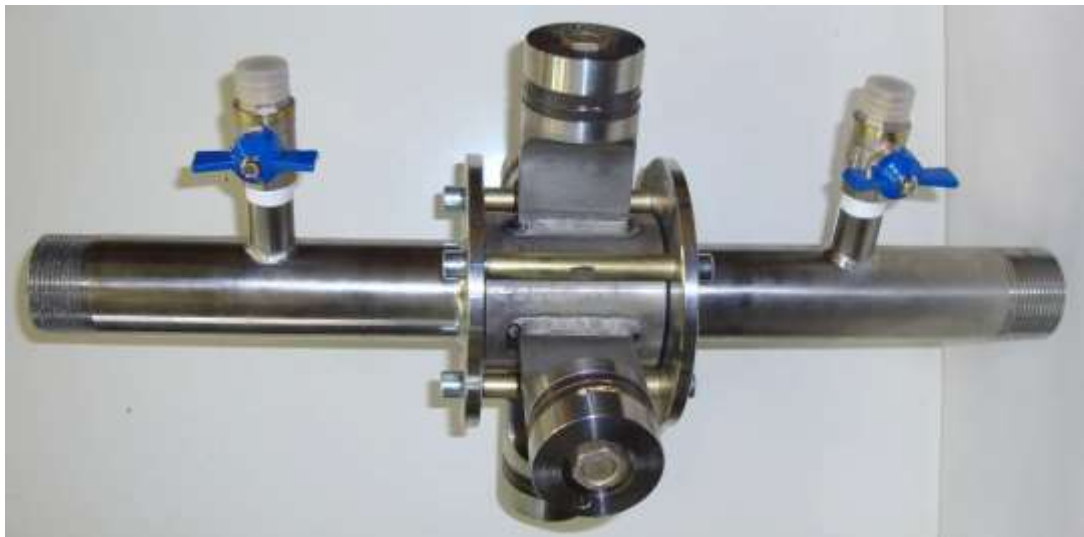


Рис. 1.48 – Приклад виготовлення проточного ультразвукового трубчастого вібратора підвищеної інтенсивності

Крім цього, результати експериментів дозволили рекомендувати для підвищення ефективності обробки потоку технологічної рідини виконувати послідовну установку акустично розв'язаних проточних трубчастих вібраторів (рис. 1.49). Акустична розв'язка вібраторів виконана за допомогою гумових ущільнювальних елементів, що дозволяє розташувати вібратори максимально близько один від іншого, забезпечивши компактність технологічного обладнання.



Рис. 1.49 – Пристрій для ультразвукової кавітаційної обробки рідини в потоці

У цьому випадку за рахунок великої поверхні випромінювання в рідину можливо ввести суттєво більшу кількість ультразвукової енергії. На внутрішній поверхні кілець при цьому не утворюється кавітаційного прошарку, що поглинає та розсіює ультразвукову енергію, а слабка кавітаційна ерозія випромінюючої внутрішньої поверхні кілець забезпечує довговічність кавітаційної камери. У кавітаційній камері конструктивно забезпечується рух рідини тільки по осі камери, тобто через область із максимальною інтенсивністю кавітації.

Кожна наступна секція може встановлюватися безпосередньо за попередньою або ж на відстані, яка повинна дорівнювати кратному парному числу довжин півхвиль ультразвукових коливань, що дозволить якісніше обробляти рідину (рис. 1.50).

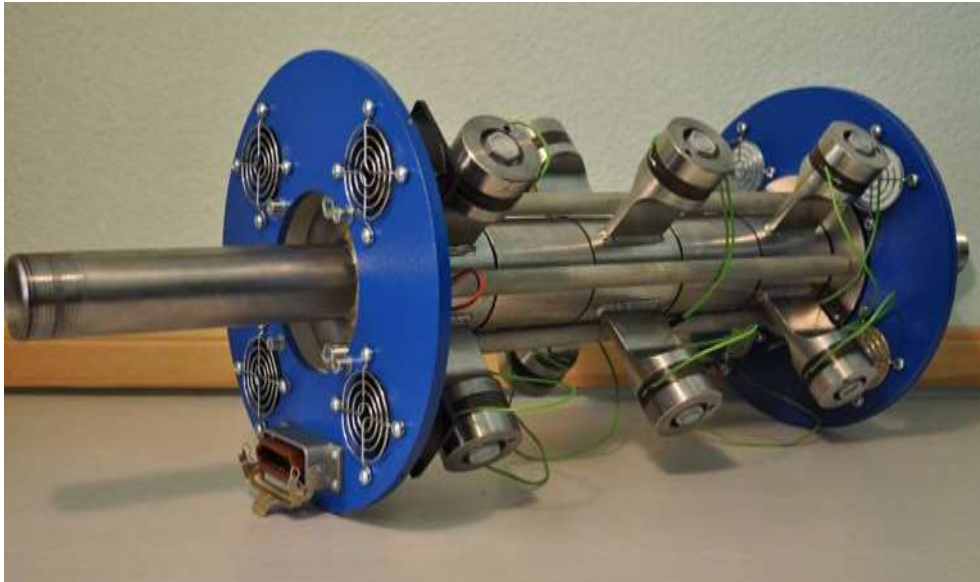


Рис. 1.50 – Трисекційна проточна установка підвищеної інтенсивності ультразвуку з проставками, потужністю 1200 Вт.

Для оцінки ефективності розроблених ультразвукових кавітаторів необхідно провести їх лабораторно-промислову апробацію в різних технологічних процесах.

1.5. Лабораторно-промислова апробація розробленого проточного кавітатора з високою інтенсивністю ультразвуку для обробки рідких середовищ

Ефекти, що супроводжують явище ультразвукової кавітації в рідині, забезпечують підвищення ефективності багатьох технологічних процесів [1 – 20]. Введення в рідину акустичних коливань високої інтенсивності призводить до зародження, пульсацій і захопування парогазових

кавітаційних бульбашок, виникнення акустичних мікротечій. Ударні хвилі й кумулятивні струмені, що виникають при захопуванні кавітаційних бульбашок, інтенсивно руйнують тверді поверхні. Акустичні мікротечії забезпечують високоякісне видалення жирових плівок з поверхонь виробів і перемішування рідинних компонентів на молекулярному рівні. Високий тиск і температура, що виникають у мікрооб'ємах при захопуванні кавітаційних парогазових бульбашок, створюють умови для виникнення в них електричних зарядів, багатих на енергію дисоційованих і іонізованих молекул, а також атомів і вільних радикалів, тобто приводить до активації рідини [88]. Ударні хвилі, тиск, високі температури та інтенсифікація хімічних процесів, що супроводжують ультразвукову кавітацію, забезпечують бактерицидний ефект кавітації.

Ефективність ультразвукових кавітаційних технологій у значній мірі залежить від ефективності введення в рідину ультразвукової енергії і можливості досягнення високої інтенсивності ультразвукових коливань.

Результати виконаних аналітичних і експериментальних досліджень дозволили запропонувати нове вискоефективне кавітаційне обладнання, що дозволяє досягти високого рівня ефективності ряду технологічних процесів.

1.5.1. Ультразвукова кавітаційна інактивація мікроорганізмів у рідких середовищах

Наявність у рідкому середовищі різноманітних за своєю структурою, розмірах і формі мікроорганізмів (бактерій, грибів, водоростей, цвілі) може привести до цілого ряду проблем у технологічних процесах і обладнанні. Боротьба з наслідками їх життєдіяльності, наприклад, у харчових продуктах, технологічних

середовищах, у системах зливу стічних вод підприємств або водопостачання міст питною водою, перетворилася на цілий напрямок діяльності науки й техніки.

У воді й технологічних рідинах найчастіше наявні три групи мікроорганізмів, які здатні викликати в кінцевого споживача й обслуговуючого персоналу різного роду захворювання: бактерії, віруси, гриби і "найпростіші". Захворювання, викликані цими мікроорганізмами, різноманітні - від подразнення шкірного покриву до смертельно небезпечних інфекцій, спалахи яких здатні привести до виникнення епідемій [124]. Враховуючи всю значимість проблем, до яких може привести життєдіяльність мікроорганізмів, знезаражування є обов'язковим і заключним етапом підготовки води та рідких технологічних середовищ перед безпосереднім використанням їх людиною.

1.5.1.1. Особливості будови мікроорганізмів, що заражають рідкі середовища

Ефективність процесу інактивації мікроорганізмів у значній мірі залежить від їхніх властивостей - структури, геометричних розмірів і форми.

Усі мікроорганізми класифікуються за трьома категоріями [125]:

- Vira - до цієї категорії належать представники вірусів;
- Eucariotae - до цієї категорії належать представники грибів і "найпростіших";
- Procariotae - до цієї категорії належать представники бактерій.

Для більшості прокаріотів клітинна будова однакова і (рис. 1.51) є набором основних компонентів, таких як клітинна стінка, цитоплазматична мембрана, цитоплазма із включеннями й

нуклеотидами. У будові клітки можуть бути присутнім додаткові структури, такі як капсула, жгутики, пілі.

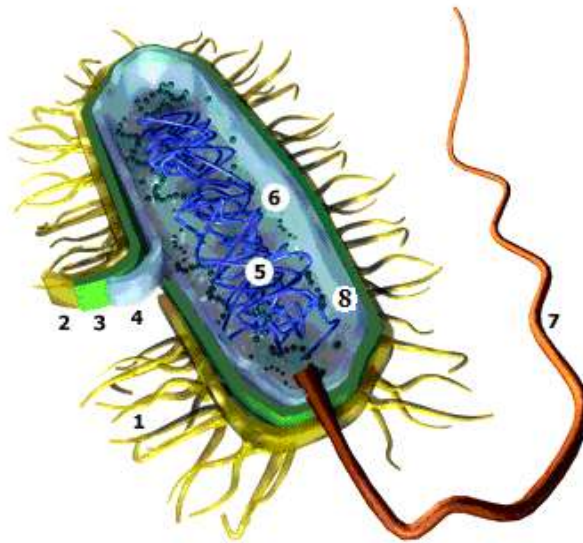


Рис. 1.51 – Будова бактеріальної клітки (схема) [126] (1- Pili – пілі; 2 – Capsule - капсула; 3 – Cell wall - клітинна стінка; 4 – Cytoplasmic membrane - цитоплазматична мембрана; 5 – Nucleoid - нуклеоїд; 6 – Ribosomes - рибосоми; 7 – Flagellum - жгутик; 8 – Cytoplasm - цитоплазма.)

За будовою клітинної стінки розрізняють грампозитивні та грамнегативні бактерії. Грампозитивні бактерії мають товсту (багатошарову) клітинну стінку. При реакції по Граму вони набувають фіолетового забарвлення. Грамнегативні бактерії мають тонку клітинну стінку, прикриту зовні потрійним ліпидовмісним шаром (зовнішня мембрана). На відміну від грампозитивних, при реакції по Граму вони набувають червоного кольору [127].

За формою будови тіла бактерії поділяють на три основні групи: кулясті (рис. 1.52), паличкоподібні (рис. 1.53) і звиті (рис. 1.54) [126, 128].

Кулясті бактерії часто називають коками, тому що для цієї групи властива куляста або овальна форма тіла. За характером розташування

клітин кулястих бактерій виділяють такі різновиди, як: Мікрококи, Диплококи, Стрептококи, Стафілококи.



Рис. 1.52 – Кулясті бактерії (Стрептококи). Електронна мікрофотографія (ЕМ)

Паличкоподібні бактерії можуть бути правильної й неправильної форми, у тому числі розгалуженими, можуть бути загостреними, закругленими, підрубленими і т.д. Характер розташування окремих клітин дозволяє виділити монобактерії, стрептобактерії, диплобактерії.

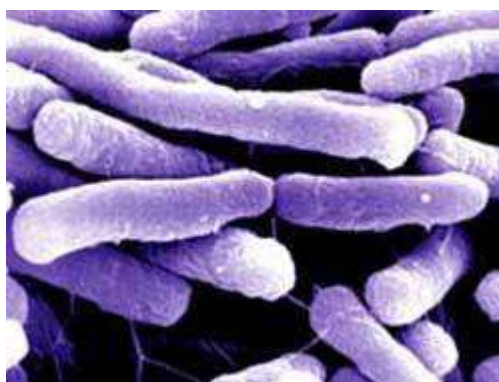


Рис. 1.53 – Паличкоподібні бактерії (кишкова паличка). ЕМ

Представники групи звитих бактерій за формою будови свого тіла являють собою вигнуті тіла, що мають один або кілька вигинів. Залежно від кількості вигинів, вони поділяються на Вібріонів (не більш одного

вигину) і Спірохети (більш одного вигину у своїй будові).

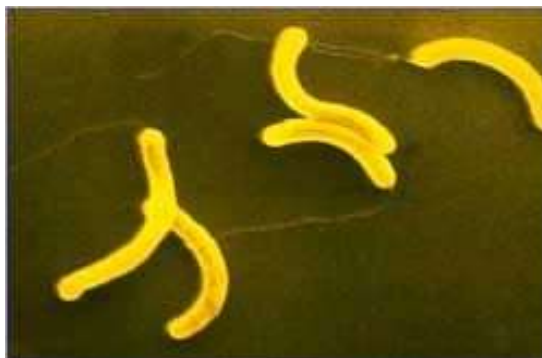


Рис. 1.54 – Звиті бактерії (холерний вібріон). ЕМ

Лінійні розміри бактеріальної клітки вимірюються в мікрометрах і нанометрах. Середні їхні розміри коливаються в межах 2...3 мкм у довжину й 0.3...0.8 мкм завширшки [127].

1.5.1.2. Застосування розробленого кавітатора в технологічному процесі інактивації мікроорганізмів у виробничих стоках

Для багатьох технологічних процесів неприпустиме застосування хімічних реагентів або високої напруги для знезараження, оскільки це може призвести до зміни властивостей технологічних рідин або до травмування обслуговуючого персоналу. Безреагентні способи інактивації мікроорганізмів, наприклад застосування ультрафіолету, у деяких випадках, також може не дати бажаного результату з причин, зазначених у першому розділі. Застосування ультразвукової кавітації найкращий спосіб знезараження рідких середовищ.

Експериментальне дослідження процесу інактивації мікроорганізмів у кавітаційній області, створюваній ультразвуковими приводами-кавітаторами, необхідно починати з обґрунтованого одержання робочого матеріалу.

Необхідне для експериментів заражене рідке середовище можна одержати як мінімум двома способами:

- перший - це штучно заражена вода. Цей метод передбачає додавання в стерильну воду, у якій гарантовано відсутні живі мікроорганізми, певного кількості різних видів мікроорганізмів для одержання, так званої, "мікробної суспензії";

- другий - використовувати реальні рідкі середовища, заражені всілякими мікроорганізмами.

Перший спосіб дозволяє самим вибирати вид і кількість мікроорганізмів, які будуть піддаватись озвученню. Однак такі, штучно створені, мікробні суспензії можуть і не зустрічатися в реальних технологічних рідинах, що може стати причиною некоректності висновків про реальну ефективність того або іншого ультразвукового кавітаційного обладнання.

Дослідження ефективності методу знезаражування і технологічного обладнання на реальних рідинах не дозволяє оцінити весь потенціал розробленої установки стосовно широкого спектра відомих мікроорганізмів.

Логічно припустити, що ефективність знезаражування рідини шляхом ультразвукового кавітаційного впливу залежить від розмірів і структури мікроорганізмів. Тому дослідження процесу інактивації мікроорганізмів необхідно починати із впливу ультразвукової кавітації на "найпростіших", які за розмірами значно більше представників групи бактерій і вірусів. Для цієї мети доцільно задіяти другий спосіб одержання робочого середовища.

Необхідний для досліджень вихідний матеріал був отриманий з відстійників м'ясопромислового комплексу, у яких перебуває технологічна вода, що використовувався для чищення підсобного

господарства свиноферми. Ця технологічна вода є гарним середовищем для розвитку і росту всіляких мікроорганізмів.

Упровадження розробленої ультразвукової кавітаційної установки було виконано в Інституті біоорганічної хімії й нафтохімії НАН України при виконанні роботи зі знезаражування водойми, у яку скидаються технологічні стоки із м'ясопромислового комплексу, який прилягає до нього (Акт впровадження додається). На свинофермі було організовано два етапи очищення стічних вод. Тому з метою одержання вихідного матеріалу з різним ступенем бактеріального забруднення, його забір проводився перед кожною очисною спорудою і безпосередньо на виході після очисних споруд (рис. 1.55).

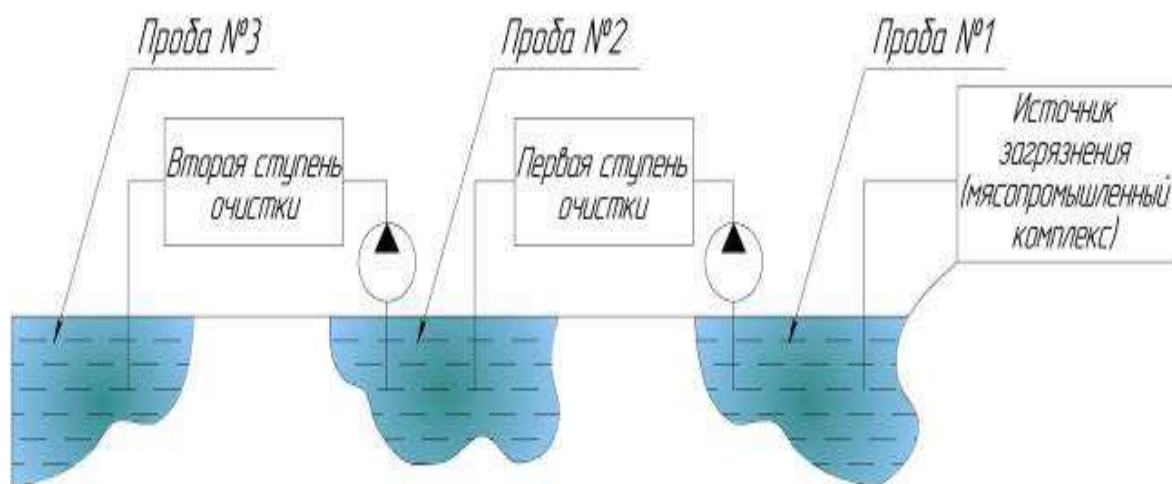


Рис. 1.55 – Схема забору проб

Отриманий матеріал був розділений на три групи залежно від місця забору. У кожній із груп були передбачені проби без обробки для виявлення наявності найпростіших і три для озвучування протягом 6, 12 і 30 секунд.

Методика проведення аналізу зараженості води згідно із прийнятими нормами передбачає одержання результатів візуальним

способом під мікроскопом по контролю п'яти точок і підсумовуванню отриманих результатів. Згідно із цією методикою був зроблений аналіз проб. Дані, отримані в ході проведення експерименту, представлено в таблиці 1.6 [129].

Таблиця 1.6 – Результати знезараження рідини

№ забору проби	Обробка	Результати	Розмір
1	Без обробки	Яйця аскариди – 5 шт. в 5-ти полях зору	40...50 мкм
2	Без обробки	Амеба – 2-3 в полі зору	20...30 мкм
3	Без обробки	Яйця аскариди – 1 шт. в 5-ти полях зору	40...50 мкм
1	УЗ обробка (УЗО) - 6 с	Амеба – 1 в поле зору	20...30 мкм
1	УЗО – 12 с	Яйця аскариди – 5 шт. в 5-ти полях зору	40...50 мкм
1	УЗО – 30 с	Не виявлено	-
2	УЗО – 30 с	Не виявлено	-
3	УЗО – 30 с	Не виявлено	-

Дані, отримані при проведенні цього експерименту, дозволяють стверджувати, що ультразвукова кавітація навіть при таких порівняно низьких інтенсивностях ультразвуку є ефективним методом інактивації "найпростіших", які можуть перебувати в рідинах різного технологічного призначення.

Однак для ефективної інактивації мікроорганізмів у потоці необхідно зменшити необхідний час перебування "найпростіших" у зоні дії ультразвукової кавітації. Це можливо за рахунок підвищення інтенсивності ультразвукових коливань.

При цьому:

- 1 - забір здійснювався перед першим етапом очищення;
- 2 - забір здійснювався перед другим етапом очищення;
- 3 - забір здійснювався на виході після очисних споруд.

1.5.1.3. Застосування розробленого кавітатора в технологічному процесі дезінтеграції клітин мікроорганізмів

Незворотне порушення цілісності структури клітин мікроорганізмів використовується не тільки при інактивації, але й у процесі дезінтеграції клітинних структур. Отримані при дезінтеграції, компоненти можуть використовуватися для одержання білкових речовин харчового призначення, біологічно важливих компонентів, застосовуваних у медицині, продуктів мікробіологічного синтезу, біохімічних досліджень.

Для одержання компонентів клітинних структур мікроорганізмів можна застосовувати кілька відомих хімічних або фізичних методів. Найкращі фізичні методи дезінтеграції, тому що вони не вимагають введення в робоче середовище хімічних реагентів, що може викликати утворення небажаних побічних хімічних сполук, які згодом необхідно видаляти.

Упровадження розробленої ультразвукової кавітаційної установки було виконано в інституті мікробіології й вірусології ім. Д.К. Заболотного НАН України в технологічному процесі переробки мікроорганізмів виду *Pseudomonas aeruginosa* 27, *Bacillus subtilis* 36, *Desulfovibririo* sp. 10. Обробка мікробної суспензії проводилася при різних рівнях інтенсивності ультразвуку й часу обробки. Процес дезінтеграції клітин відбувався в тонкому шарі. Результати, що підтверджують істотне підвищення ефективності вдосконаленого технологічного процесу, представлено в таблиці 1.7.

Таблиця 1.7 – Дезінтеграція клітин мікроорганізмів у зоні
ультразвукової кавітації

Показники	Вид мікроорганізмів								
	<i>Pseudomona s aeruginosa</i>			<i>Bacill us</i>			<i>Desulfovibririo sp. 10</i>		
Температура, °С	28			28			28		
Час обробки, хв.	4,5			6			6		
Інтенсивність ультразвукового поля, Вт/см ²	5	7	10	5	7	10	5	7	10
Ступінь дезінтеграції, %	100	50	75	100	50	50	100	50	75

Отримані експериментальні дані показують, що найбільший ступінь дезінтеграції клітин мікроорганізмів був досягнутий при порівняно низьких інтенсивностях ультразвуку. При цьому вдалося отримати внутрішньоклітинну речовину при мінімальному ступені засмічення її залишками зруйнованої оболонки.

1.5.1.4. Застосування розробленого кавітатора в технологічному процесі інактивації мікроорганізмів

Експериментальні дослідження [87] дозволили встановити, що рівень інтенсивності ультразвукової хвилі, введеної в рідину, визначає кількісний і якісний склад знищених мікроорганізмів. Підвищення інтенсивності ультразвукових коливань розширює різноманітність і збільшує кількість мікроорганізмів і бактерій, що гинуть при тому самому часі озвучування.

Розроблений ультразвуковий кавітатор (рис. 1.56) дозволяє ввести в рідину ультразвукові коливання інтенсивністю до 100 Вт/см².



Рис. 1.56 – Загальний вигляд експериментальної установки

Для визначення ефективності трубчастого кавітатора були проведені дослідження з інактивації мікроорганізмів. З цією метою були відібрані проби активного мулу з Бортницької станції аерації. Вихідний матеріал був розділений на дві групи для можливості подальшого порівняння методом візуального контролю під мікроскопом зразків без обробки й зразків після ультразвукової обробки. Об'єм кавітаційної камери заповнювався робочим матеріалом і зазнавав впливу ультразвукової кавітації протягом п'яти секунд при підведеній потужності 600 Вт. Порівняння стану мікроорганізмів до й після обробки представлено на рисунках 1.57 – 1.60 [130].

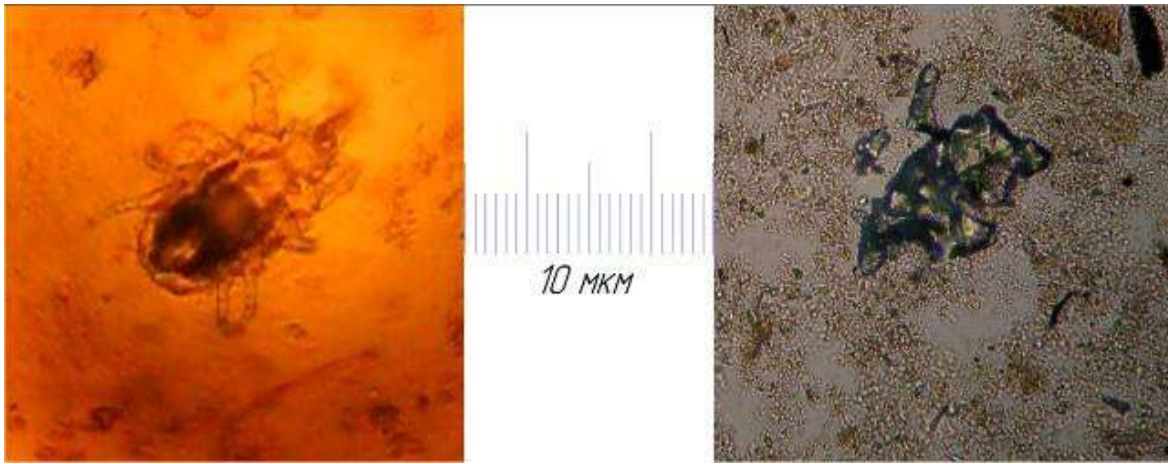


Рис. 1.57 – Представник ракоподібних (мікрофотографія)



Рис. 1.58 – Представник коловерток (мікрофотографія)

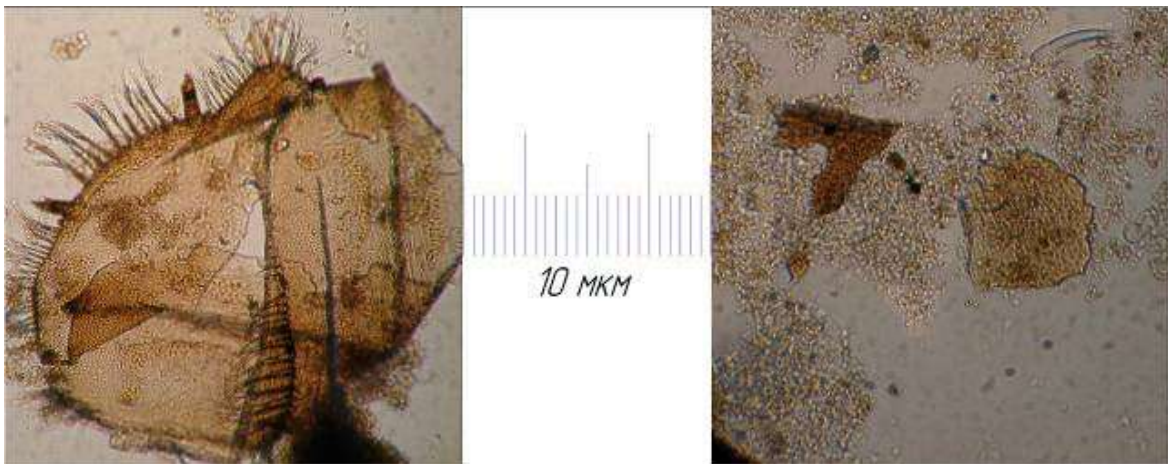


Рис. 1.59 – Представник чревоїчастих (мікрофотографія)

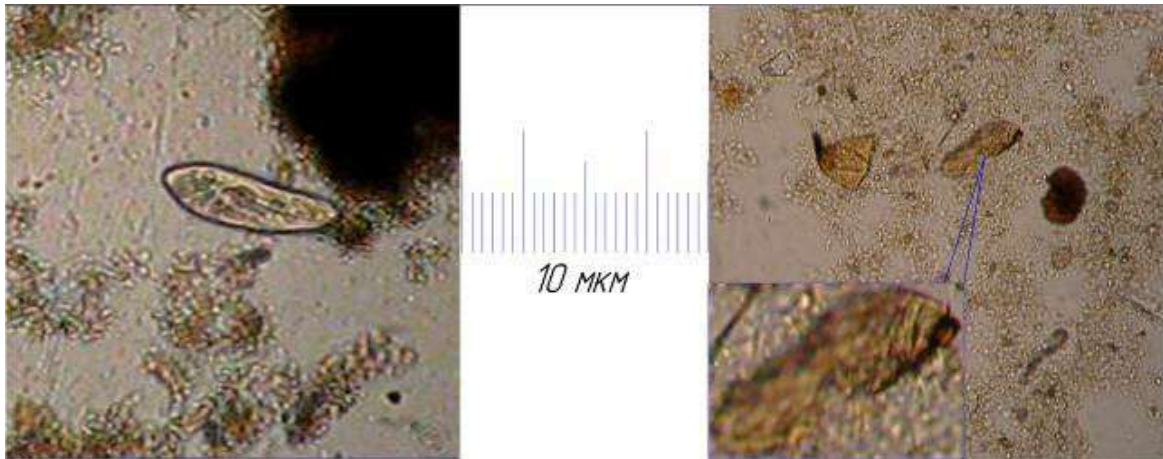


Рис. 1.60 – Представник інфузорій (мікрофотографія)

Аналіз отриманих даних підтверджує, що при введенні в рідину ультразвукових коливань із більшою інтенсивністю потрібен менший час для досягнення необхідного рівня інактивації мікроорганізмів.

1.5.1.5. Підвищення ефективності процесу ультразвукової кавітації при інактивації мікроорганізмів

Для проведення експериментів по інактивації мікроорганізмів під впливом ультразвукової кавітації були обрані музейні штами мікроорганізмів *Escherichia coli* ATCC № 25922, тому що вони є специфічним показником фекального забруднення води. Моделювання природнього забруднення води проводилося в лабораторних умовах за допомогою стандарту мутності й наступного десятикратного розведення мікробної суспензії мікроорганізмів *E. coli* в стерильній водопровідній воді, де кількість мікроорганізмів в 1 мл становить 2×10^3 .

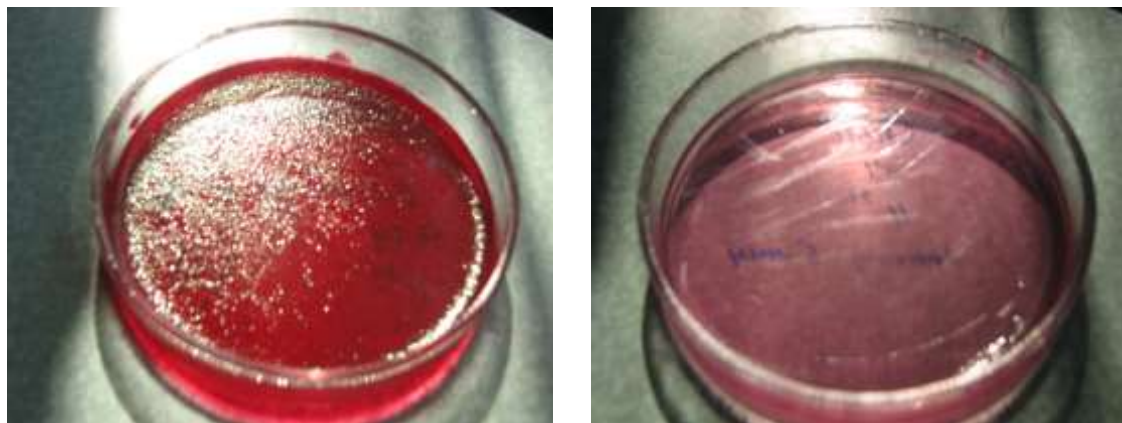
Для експериментів була використана установка (рис. 1.56), побудована на базі дослідженого раніше трубчастого вібратора, збуджуваного на нульовій моді коливань. Резонансна частота вібратора становила 25,4 кГц, споживана потужність змінювалася в діапазоні 100...500 Вт, інтенсивність ультразвуку вздовж осі вібратора - до 100

Вт/см², об'єм кавітаційної камери - 270 мл. Зміна режиму роботи обладнання здійснювалася цифровою системою керування [131].

У кавітаційну камеру експериментальної установки поміщалися мікробна суспензія (2×10^3 мікробних клітин в одному мл) і піддавалася кавітаційній обробці протягом 5 хвилин за умови підведення до ультразвукових приводів 400 Вт потужності. По закінченні часу озвучування проводилося вимірювання температури, яка склала - 49°C.

На чашки Петрі з відповідним для *E. coli* живильним середовищем Ендо було висіяно по 0,1 мл мікробної суспензії досліджуваних мікроорганізмів, які не зазнали ультразвукової обробки. Ці чашки використовувалися як контрольні зразки.

Після впливу на мікробну суспензію ультразвукової кавітації було висіяно по 0,1 мл суспензії дослідного зразка. Чашки з посівами поміщалися в термостат з температурою 37°C на 24 години для інкубації. Через 24 години були отримані результати які, представлені на рис. 1.61 [129].



а)

б)

*Рис. 1.61 – Чашки Петрі з висіяними бактеріями *E. coli* після 24 годинної Інкубації (а – контрольний зразок, б – мікробна суспензія, оброблена ультразвуковою кавітацією протягом 5 хвилин.)*

На контрольному зразку (рис. 1.61а) спостерігався суцільний ріст колоній, що свідчить про гарну життєздатність досліджуваних мікроорганізмів. Чашка з посівом мікробної суспензії, яка була піддана обробці ультразвуковою кавітацією, виявилася чистою від колоній бактерій *E. coli*, що свідчить про їхню інактивацію.

Для підтвердження того, що основним фактором в інактивації бактерій була ультразвукова кавітація, а не тепловий вплив, був проведений ряд додаткових досліджень.

Для виявлення ступеня впливу на життєздатність бактерій термічного фактора мікробна суспензія піддавалася термічній обробці при 30, 50, 60 і 70 °С з наступним посівом (рис. 1.62).

При 30 °С висіяна мікробна суспензія через 24 години утворювала колонії, що добре проглядаються на рис. 1.62а. При 50 °С повного знищення мікроорганізмів досягти не вдалося, хоча кількість колоній значно зменшилась (рис. 1.62б). Що стосується висіяних мікробних суспензій при температурі 60 і 70°С, то тут спостерігається повне знищення (рис. 1.62в).

Результати переконливо доводять, що саме кавітаційні явища, а не температурний фактор, були ключовими в інактивації бактерій, тому що температура рідини при ультразвуковому опроміненні підтримувалася значно менше, ніж необхідно для термічної інактивації.

Щоб виключити надмірне нагрівання мікробної суспензії при проведенні експериментальних досліджень по інактивації, робилась перерва в роботі ультразвукової камери на 20 хв через кожну хвилину озвучування з відбором відповідних проб і контролю температури. Після посіву й витримки в термостаті з оптимальною температурою для активного інкубування 37 °С, через 24 години був отриманий результат проведених експериментальних досліджень (рис. 1.63).



a)



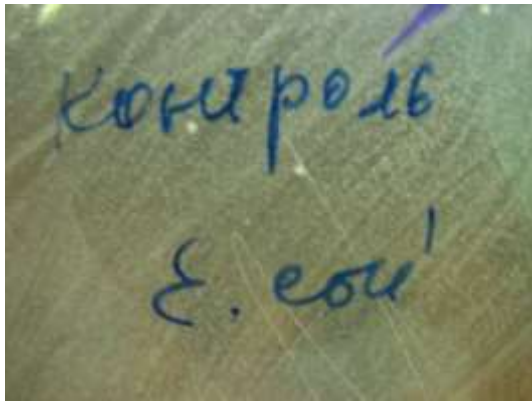
б)



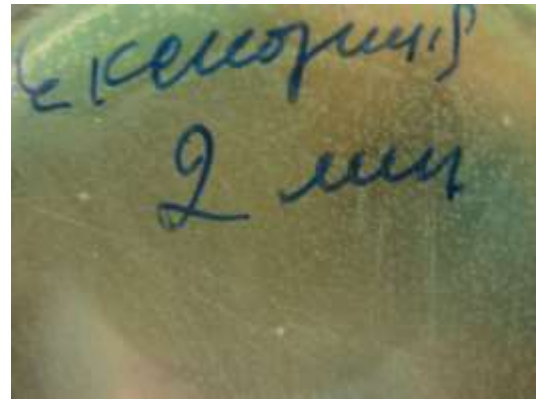
в)

*Рис. 1.62 – Чашки Петри з висіяними бактеріями *E. coli* після 24-годинної інкубації (а – термічна обробка при 30 °С, б – термічна обробка при 50 °С, в – термічна обробка при 70 °С.)*

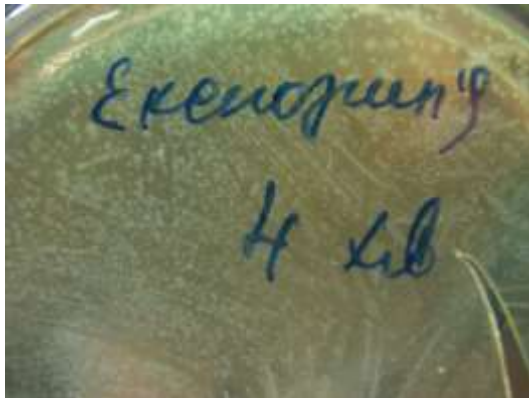
При ультразвуковій кавітаційній обробці вдалося втримувати температуру оброблюваної рідини в межах 30...47 °С. Цей діапазон температур відповідає оптимальному режиму для росту й розмноження даного виду бактерій, що було підтверджено в попередніх серіях експериментів. По закінченні шести хвилин озвучування з перервами в роботі на 20 хв після кожної хвилини повного знищення досягти не вдалося.



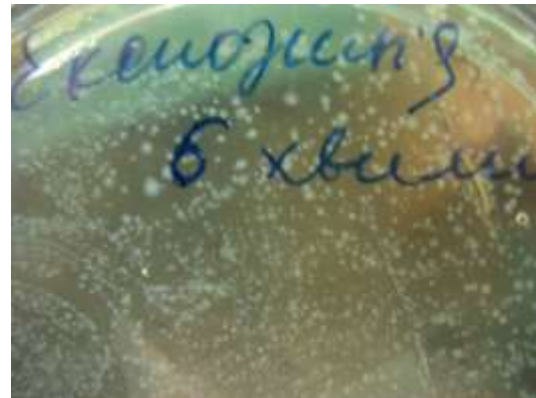
а)



б)



в)



г)

Рис.1.63 – Чашки Петрі з висіяними бактеріями E. coli після 24-годинної інкубації (а – контрольний зразок (30 °С), б – оброблена ультразвуком протягом 2 хвилин мікробна суспензія (35,5 °С), в – оброблена ультразвуком протягом 4 хвилин мікробна суспензія (42 °С), г – оброблена ультразвуком протягом 6 хвилин мікробна суспензія (47 °С).)

Цей факт можна пояснити тим, що для проведення досліджень застосовувалася стерильна вода, у якій гарантовано відсутні живі мікроорганізми, які могли б зіграти роль стримуючого фактора росту, а всі хімічні елементи, необхідні для повноцінної репродукції, перебували в надлишку, тому двадцяти хвилинні перерви в роботі створили

можливість повторного зараження оброблюваного середовища. Це яскраво проілюстроване на рис. 1.63.

Можна зробити висновок, що сумарна доза озвучування не може дорівнювати дозі при безперервному процесі.

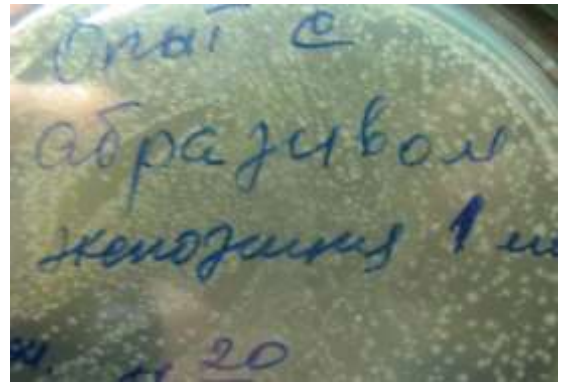
Для інтенсифікації процесу інактивації мікроорганізмів, зокрема, можливе додавання механічних домішок у робочу зону ультразвукової проточної камери, які будуть призводити до механічних ушкоджень оболонки мікроорганізмів. Для перевірки цієї гіпотези в кавітаційну камеру поміщалося 270 мл мікробної суспензії (2×10^3 мікробних клітин в одному мл) з додаванням шести грамів карбїду бору. Ця суміш зазнала впливу ультразвукової кавітації при підведеній потужності 400 Вт. Як і в попередньому експерименті, для виключення надмірного нагрівання мікробної суспензії при проведенні експериментальних досліджень, проводилася перерва роботи ультразвукової камери на 20 хв. через кожну хвилину озвучування з відбором відповідних проб і контролем температури. Результати представлені на рис. 1.64 [132].

Контрольні зразки й робочі проби, які були піддані ультразвуковому опроміненню, були висіяні по 0,1 мл на чашки Петрі з відповідним живильним для *E. coli* ATCC № 25922 середовищем і поміщені в термостат з температурою 37 °C на 24 години для інкубації.

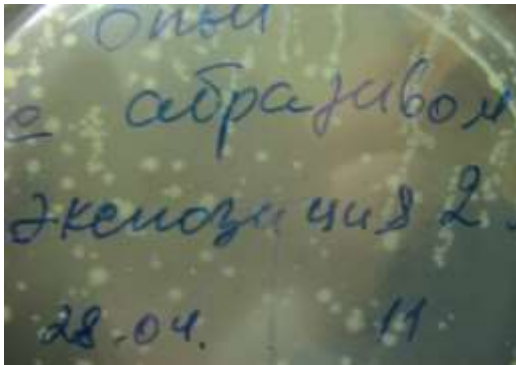
Додавання механічних домішок у робочу зону ультразвукової камери дійсно сприяло інтенсифікації процесу інактивації бактерій *Escherichia coli*. Незважаючи на перерви в роботі, які, безсумнівно, приводили до повторного зараження оброблюваного середовища, вдалося зменшити час, необхідний для повної інактивації бактерій в 5...6 разів. Температурний режим також вдалося втримати в необхідному діапазоні.



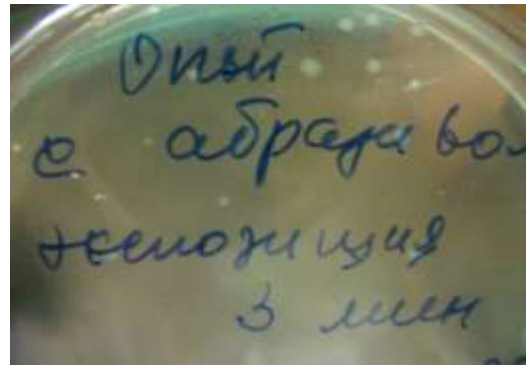
а)



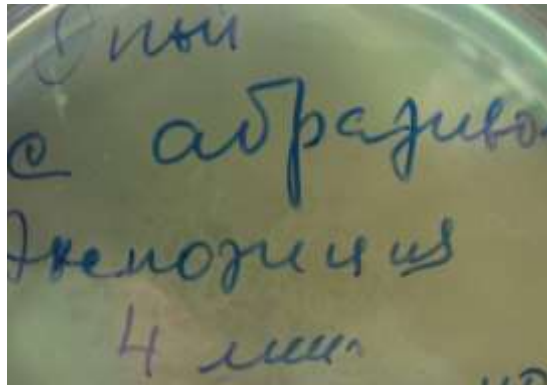
б)



в)



г)



д)

Рис.1.64 – Чаши Петрі з висіяними бактеріями *E. coli* після 24 годинної інкубації (а – контрольний зразок (30 °С), б – оброблена ультразвуком протягом 1 хвилини мікробна суспензія (32 °С), в – оброблена ультразвуком протягом 2 хвилин мікробна суспензія (38 °С), г – оброблена ультразвуком протягом 3 хвилин мікробна суспензія (43 °С), д – оброблена ультразвуком протягом 4 хвилин мікробна суспензія (45,5 °С).)

1.5.1.6. Застосування ультразвукової кавітації для знезараження змащувально-охолоджуваної рідини

Результатами біопошкоджень палива, масел і мастильних матеріалів можуть бути погіршення якості самих продуктів, а також корозія резервуарів, трубопроводів, паливних і мастильних систем і т.п. Для обслуговуючого персоналу небезпека контакту з технологічними рідинами, зараженими мікроорганізмами, полягає в появі шкірних дерматитів, алергічних реакцій та інших захворювань [133].

Мікробне забруднення змащувально-охолоджуючих рідин (ЗОР), особливо на водній основі, негативно впливає на якість технологічного процесу металообробки. ЗОР є гарним поживним середовищем для мікроорганізмів, які відокремлюють органічні інгредієнти, наприклад, масло та емульгатори від водної основи. У результаті цього відділяється вільне масло (відбувається часткова деемульгація), підсилюється корозійний ефект, викликаний появою органічних кислот внаслідок метаболізму мікроорганізмів.

ЗОР має підвищену ймовірність бактеріального забруднення через постійний контакт із навколишнім середовищем у технологічному процесі (рис. 1.65 [134]). Підвищена температура і поживне середовище в резервуарі для збору ЗОР створюють сприятливі умови для стрімкого розмноження й розвитку мікроорганізмів.

Для боротьби з мікроорганізмами звичайно використовують спеціальні присадки (біоциди), які інактивують мікроорганізми. Але в застосування біоцидів є й негативні сторони [135]:

- такі присадки небезпечні для використання;
- мертві бактерії, накопичуючись, створюють біомасу, що є поживним середовищем для живих бактерій, що призводить до їхнього подальшого розмноження;

- робітники, що перебувають у регулярному контакті із забрудненою ЗОР, можуть одержати серйозні захворювання внутрішніх органів і шкірного покриву, алергій, викликаних бактеріями й використанням біоцидів;

- термін служби вітчизняних біоцидів для ЗОР становить від 30 до 50 днів.



Рис. 1.65 – Приклад контакту ЗОР у робочій зоні різального інструменту з навколишнім середовищем [134]

Залежно від видового складу, припустима кількість мікроорганізмів у ЗОР коливається від 15 до 50 млн. клітин/мл. Така кількість мікроорганізмів у ЗОР може вирости протягом одного тижня. Непридатну для подальшого використання в технологічному процесі ЗОР розбавляють водою в пропорції 40:1 або 50:1, після чого скидають у стічні води [136]. Таким чином, захист ЗОР від біопшкоджень і продовження строку її служби є важливою економічною й екологічною проблемою.

До основних мікроорганізмів, що викликає біопшкодження водоемульсійних ЗОР, слід віднести представників бактерій родів

Desulfovibrio, *Pseudomonas*, *Fusarium*, а також грибів *Aspergillus*, *Penicillium*, *Cladosporium* і дріжджів. Найнебезпечнішими для людини є представники патогенних форм, таких як *Escherichia*, *Staphylococcus*, *Pseudomonas* і ін.

Індикаторами біопшкодження ЗОР можуть бути поява різкого гнильного і сірководневого запахів, які є наслідком спільної дії гетеротрофних бактерій *Pseudomonas* і анаеробних сульфатовідновлюючих бактерій (СВБ) роду *Desulfovibrio*, зміна кольору рідини в процесі експлуатації від опалово-синього до чорного кольору (рис. 1.66) з різноманітними відтінками внаслідок утворення сульфідів заліза, зміна в'язкості, підвищення кислотності і, як наслідок, корозійна агресивність і т. д [137].

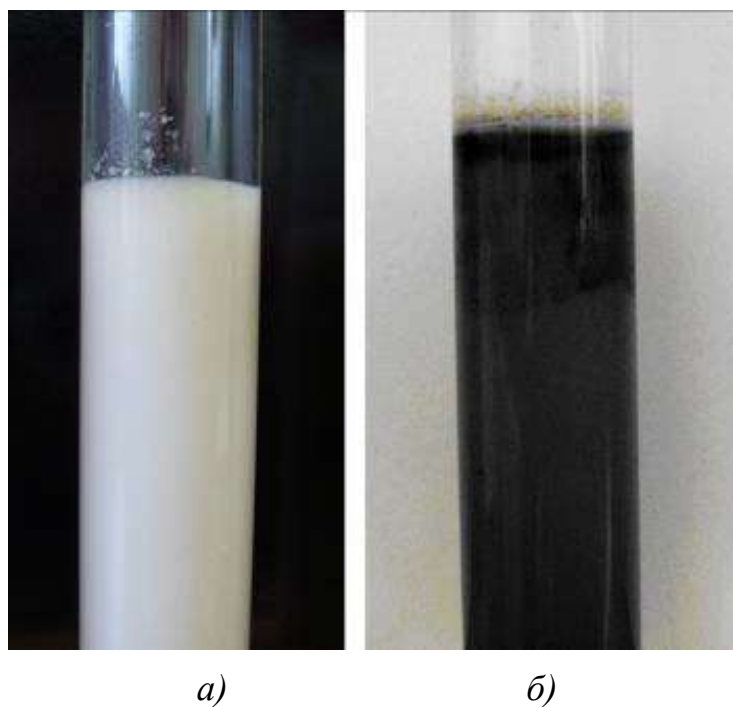
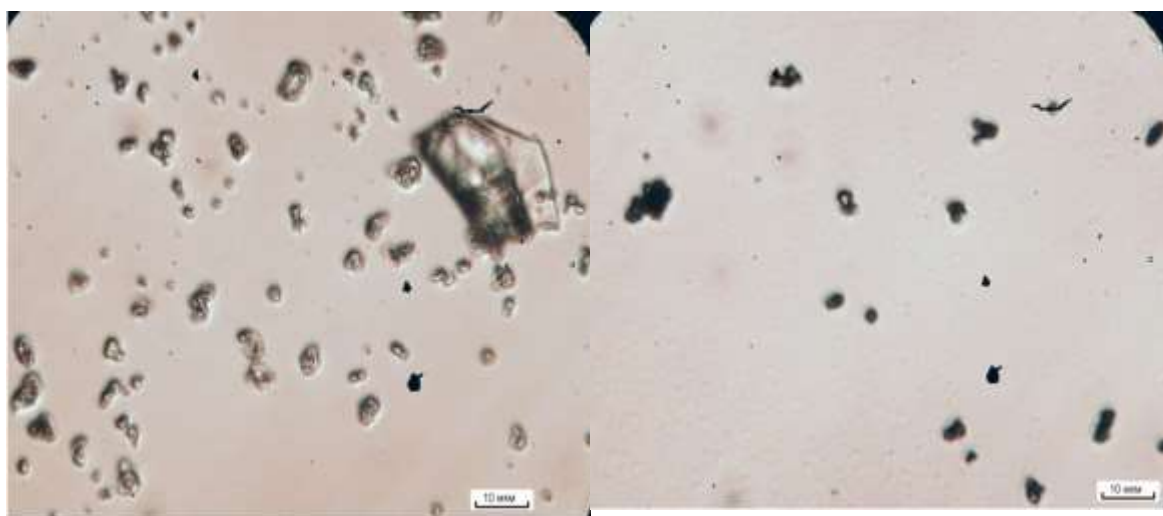


Рис. 1.66 – Приклад біопшкодження ЗОР (а – бактеріально чиста ЗОР, б – ЗОР, піддана біопшкодженню)

Представлені експериментальні дослідження процесу інактивації

мікроорганізмів у кавітаційній області розробленим кавітаційним обладнанням на прикладі *Escherichia coli* - патогенного мікроорганізму, який також є присутнім у бактеріально зараженій ЗОР. Ці дослідження показали доцільність застосування ультразвукової кавітації для інактивації даного виду бактерій. Крім бактеріального забруднення ЗОР у процесі експлуатації накопичує велика кількість дрібних металевих часток оброблюваних поверхонь, абразивних матеріалів, піску, пилу, часток різального інструменту (рис. 1.67) і т.д.



а)

б)

Рис. 1.67 – Приклад механічних домішок (а – мікрофотографія піску, б – мікрофотографія вугільного пилу.)

Дрібні механічні частки, які потрапили в ЗОР у процесі роботи, приводять до погіршення охолоджуючих і змащувальних властивостей ЗОР, знижують якість обробки через те, що дрібні частки блокують металорізальний інструмент, сприяють зростанню абразивного ефекту й приводять до більшого зношування інструмента і т.д.

Для усунення цих механічних часток звичайно застосовують магнітні, паперові, тканинні фільтри і фільтри-відстійники.

У роботі [132], присвяченій проблемам підвищення ефективності ультразвукової кавітаційної інактивації рідких середовищ, розглядається питання можливості застосування механічних часток як додаткового фактора інтенсифікації процесу інактивації бактерій. Результати цих експериментальних досліджень підтвердили доцільність використання механічних часток (рис. 1.64) для знезаражування рідких технологічних середовищ, у яких припустимі деякі концентрації механічних домішок або технологія допускає подальшу фільтрацію знезараженої рідини від механічних домішок.

У якості абразиву застосовувався порошок карбіду бору (рис. 1.68), що не завжди є економічно виправданим у технологічному процесі знезараження.

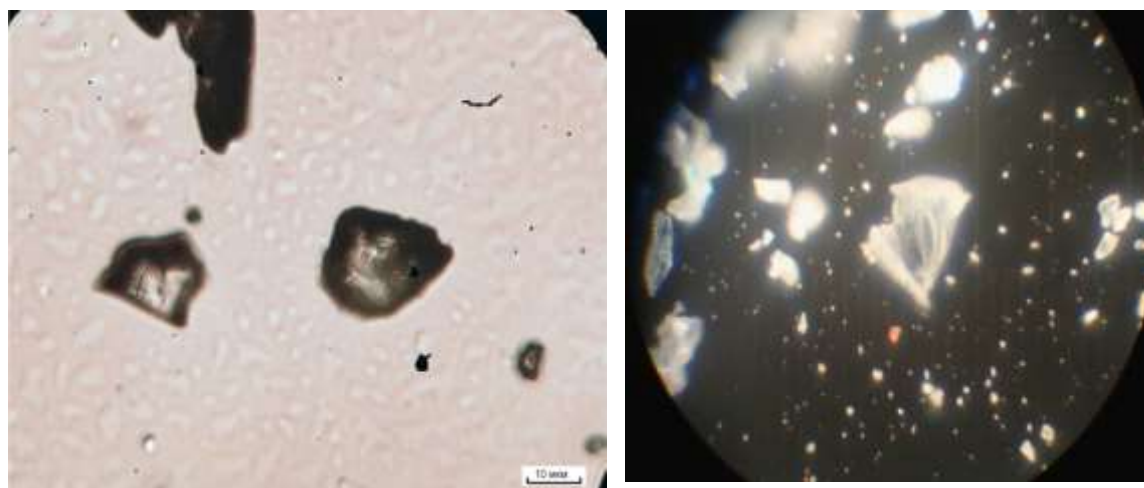


Рис. 1.68 – Мікрофотографії карбіду бору

Застосувавши метод стереологічної металографії для кількісної оцінки лінійних розмірів часток порошку (рис. 1.69), можна стверджувати, що в якості замітника карбіду бору можна рекомендувати використання механічних часток, які перебувають у ЗОР у якості забруднювача, тому що їхня кількість і розміри пропорційні [138].

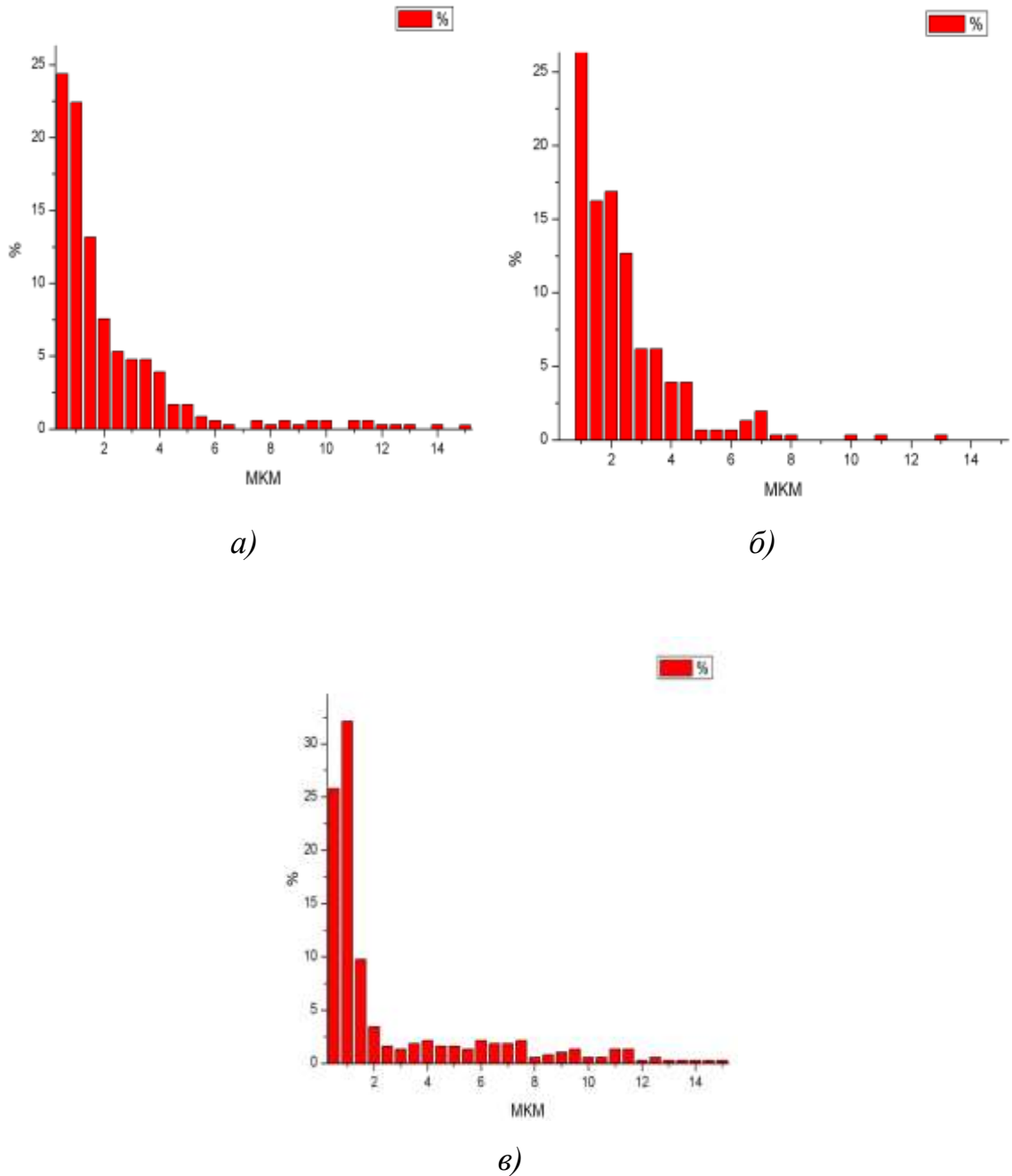


Рис. 1.69 – Розподіл часток по середніх діаметрах Фере (а – карбід бору, б – пісок, в – вугільний пил)

Виходячи з вищевикладеного, був запропонований ефективний спосіб продовження терміну служби ЗОР за рахунок установки в системі циркуляції перед фільтраційним каскадом проточного ультразвукового

обладнання, яке забезпечує інактивацію мікроорганізмів за рахунок ультразвукової кавітаційної обробки, а наявність механічних часток призводить до інтенсифікації процесу [139]. Крім боротьби з бактеріальним забрудненням проточна ультразвукова установка поліпшує реологічні й змащувальні властивості ЗОР за рахунок постійного інтенсивного перемішування складових компонентів на молекулярному рівні.

РОЗДІЛ 2. ТЕХНОЛОГІЯ ФІЛЬТРУВАННЯ РІДИНИ В УЛЬТРАЗВУКОВОМУ КАВІТАЦІЙНОМУ СЕРЕДОВИЩІ

Інтенсивний розвиток технологій із використанням рідин потребує постійного підвищення ефективності технологічного обладнання, яке забезпечує їх очищення від механічних та бактеріальних забруднень. На сьогоднішній день розроблено значну кількість способів та обладнання для очищення технологічних рідин, які відрізняються ефективністю та якістю очищення. Пристрої, які забезпечують фільтрування рідини, повинні відповідати певним вимогам, серед яких ступінь фільтрації від механічного та бактеріального забруднення; продуктивність; можливість відновлення фільтруючої здатності; стійкість фільтроелементу до фізичного або хімічного руйнування; термін або ресурс працездатності.

Найпоширенішим методом фільтрування є очищення рідин за допомогою пористої перегородки. Однак такий тип фільтрів не відповідає всім, наведеним вище, вимогам. При використанні пористих перегородок створюється значний перепад тиску, що приводить до зниження витрати. З часом у каналах пористої перегородки відбувається накопичення забруднювача, що призводить до вторинного забруднення рідини. Тому фільтри з пористою перегородкою потребують періодичної заміни. Проте існують фільтри, що використовують для очищення ультразвукові коливання, інтенсивність яких перевищує поріг виникнення кавітації. Фільтрування в умовах ультразвукового поля дозволяє збільшити час безперебійної роботи фільтрувального обладнання за рахунок використання ефектів, що супроводжують явище ультразвукової кавітації.

Однак, відсутність методики розрахунку ультразвукових кавітаційних фільтрів та залежностей, які дозволять визначати їх раціональні експлуатаційні та конструктивні параметри та обирати

матеріал, унеможлиблюють створення ефективних в експлуатації конструкцій на основі процесу ультразвукового впливу на рідину.

Таким чином, актуальною науково-технічною задачею є розроблення науково обґрунтованих технічних рішень кавітаційних фільтрів з ефектом самоочищення, які забезпечують необхідний ступінь фільтрування, високу продуктивність та регенерацію фільтрувальної перегородки, що дає можливість підвищити ефективність технологічних процесів з використанням рідини.

2.1. Сучасний стан проблеми фільтрування рідин

Вода є одним з найбільш цінних природних багатств у світі. Постійне збільшення населення та інтенсивний розвиток технологій потребують постійного покращення якості технологій для фільтрування рідин.

Розвиток хімічних галузей промисловості призвів до насичення водних ресурсів різними шкідливими речовинами, а підвищення вимог до якості очищення технологічних і стічних вод вимагає широкого застосування різноманітних методів очищення рідких середовищ. В даний час проводиться значна робота по створенню хімічних виробництв, які б не призводили до забруднення водних ресурсів стічними водами, передбачається використання стічних вод в технологічних процесах і в системах оборотного водопостачання [140].

Методи очищення рідких середовищ можна умовно поділити на деструктивні і регенеративні [141 – 143]. Деструктивні методи очищення полягають у руйнуванні, забруднюючи воду, речовин шляхом їх окислення або відновлення. Утворені при цьому продукти розпаду видаляються з води у вигляді осаду або газів, або залишаються в ній у формі розчинних мінеральних солей. Регенеративні методи дозволяють

відділяти та утилізувати окремі речовини, що містяться у воді. Такі методи далеко не завжди очищають воду до такого стану, коли її можна скидати у водойми. У цих випадках воду очищають деструктивними методами.

У всіх випадках очищення, першою стадією процесу є механічна очистка, призначена для звільнення води від зважених і колоїдних частинок. Наступним етапом очищення є видалення з води розчинених у ній хімічних сполук фізико-хімічними, хімічними, електрохімічними, біологічними методами. У багатьох випадках для підвищення якості очищення води доводиться застосовувати комбінації із зазначених методів. Як найбільш часто використовувані методи очищення середовищ від грубодисперсних, дрібнодисперсних і колоїдних частинок застосовуються такі: відстоювання [144, 145], флотація [146, 147], фільтрування [145, 148, 149], центрифугування [150], коагуляція [144, 151], флокуляція [151 – 153], електричні методи осадження [154]. Дані методи можуть використовуватися як самостійно, так і в різних поєднаннях між собою, наприклад, електролітична флотація, коагуляція і центрифугування [155].

На сьогоднішній день використовується широкий спектр обладнання для очищення рідких середовищ з різною продуктивністю, конструктивними особливостями та вимогами до якості отриманих рідин.

Основними вимогами до фільтрів у процесі очищення є:

- високий ступінь очищення;
- значна продуктивність;
- можливість відновлення після демонтажу чи під час роботи;
- висока стійкість апаратів до хімічного та термічного впливу;
- значний час роботи без заміни.

Чистота води, яка застосовується у виробництві, є одним з факторів, що визначають якість кінцевого продукту. Особливо високі вимоги пред'являються до технологічної води при виготовленні високоякісних динітратів целюлози, харчових продуктів та ін. Підвищені вимоги, що пред'являються до якості води, використовуваної в технологічному процесі, є основною причиною складності створення замкнених водяних систем.

2.1.1. Способи очищення рідин від механічних забруднень

Для видалення забруднень з рідин можуть використовуватися різні методи, засновані на хімічних, фізико-хімічних та фізичних процесах [156 – 158]. Хімічні методи полягають в застосуванні різних речовин, що вступають з наявними в рідині включеннями в хімічні реакції, і наступному видаленні продуктів, що утворилися в результаті цих реакцій. Фізико-хімічні методи засновані на процесах коагуляції, адсорбції або селективного розчинення забруднень. Різновидом адсорбційних процесів є іонообмінний процес. Фізичні методи очищення рідин включають використання силових полів, що створюються гравітаційними, відцентровими, електричними, магнітними та іншими силами, очищення шляхом фільтрування рідин через пористі перегородки, а також комбінацію цих методів.

Хімічні і фізико-хімічні методи зазвичай використовуються в сфері нафтопереробки та приготування різних рідин. Фізичні методи очищення знайшли широке застосування на всіх етапах життєвого циклу робочих рідин. Вибір того чи іншого методу очищення залежить від вимог до чистоти рідини, від фізико-хімічних властивостей забруднень, що містяться в ній, від місця установки і умов експлуатації, застосовуваних для цієї мети, очисних пристроїв.

2.1.1.1. Гравітаційне осадження

Гравітаційне очищення шляхом відстоювання є найбільш простим методом очищення [144, 145, 159]. Гравітаційне осадження або відстоювання застосовується для очищення від пилу, механічних домішок, суспензій і емульсій. Цей процес не забезпечує очищення від високодисперсних частинок і характеризується невеликою швидкістю осадження, тому його використовують переважно для часткового розділення неоднорідних систем. Цей процес не вимагає спеціального обладнання і може бути реалізований в будь-якому резервуарі. Недоліком цього методу є тривалість процесу очищення і неможливість його застосування в рухомих приладах.

Сутність відстоювання полягає в тому, що пил, суспензію або емульсію пропускають через камеру, на дно якої під дією сили тяжіння осідають зважені частинки. При відстоюванні повинні дотримуватися дві основні вимоги: середній час перебування потоку суспензії в апараті має дорівнювати або бути більше тривалості осадження частинок; лінійна швидкість потоку в обладнанні повинна бути значно меншою за швидкість осадження. Недотримання першої вимоги призводить до того, що частки не встигають осісти на дно, а другого - до того, що в апараті виникають вихрові потоки, які піднімають осаджені частини з нижньої частини апарату, переміщаючи їх в напрямку виходу очищеної рідини.

2.1.1.2. Очищення під дією відцентрових сил

Відцентрове очищення також вимагає суттєвої різниці щільності робочої рідини і забруднень. Ефективність відцентрової очистки залежить від в'язкості робочої рідини і зменшується при зниженні температури. Перевагами відцентрової очистки є сталість пропускної

здатності і гідравлічного опору, можливість безперервної їх експлуатації завдяки самоочищенню, а недоліками - складність виготовлення, потреба в сторонніх джерелах енергії для приводних центрифуг або необхідність відбору частини рідини з гідравлічної системи для реактивних центрифуг [160 – 162].

Для здійснення цього процесу до твердої фази необхідно докласти відцентрові сили, що досягається введенням потоку в поле відцентрових сил. Для створення поля відцентрових сил в техніці використовуються два прийоми. При першому - обертальний рух потоку рідини (газу) забезпечується в нерухомому апараті, а при другому - потік прямує в обертовий елемент апарату або машини, в якому потік обертається разом з ротором. У першому випадку здійснюється циклонний процес осадження, у другому – центрифугування [150].

Електро-імпульсне очищення є досить перспективним способом видалення з рідини забруднень [154]. Електричні очисники мають порівняно невеликі габаритні розміри, не змінюють в процесі експлуатації пропускну здатність і гідравлічний опір, дозволяють автоматизувати процес очищення. Однак ці пристрої мають досить складну конфігурацію, вимагають досить кваліфікованого обслуговування, здатні знижувати ефективність очищення в разі наведення електричних зарядів в електроізоляції електродів, вимагають використання зовнішніх джерел високої напруги. Ці недоліки стримують на цьому етапі застосування таких систем.

Очищення робочої рідини в магнітному полі обмежується видаленням частинок забруднень, що володіють феромагнітними властивостями. Для створення магнітного поля можуть застосовуватися постійні магніти або електромагніти, причому перші при однакових габаритних розмірах здатні створити більш високу напруженість

магнітного поля. До переваг магнітного очищення відноситься можливість уловлювання вельми дрібних феромагнітних частинок (до 0,5 мкм), які практично не затримуються іншими засобами очистки, але призводять до каталітичного впливу на процеси окислення робочої рідини. Недолік очищення в магнітному полі - вузька область застосування, обмежена видаленням з робочої рідини тільки феромагнітних забруднень і агрегованих з ними частинок.

2.1.1.3. Фільтрування як спосіб очищення рідин

Найбільш застосовуваним методом очищення рідини, повсюдно вживаних в даний час, є її фільтрування[145, 148, 163, 164].

Фільтрування – процес розділення неоднорідних систем за допомогою пористих перегородок, які затримують одне середовище, а пропускає інше, під дією зовнішніх сил.

Фільтрування широко використовується у різних галузях промисловості, наприклад, для видалення забруднень з робочих рідин, питної води та ін. Ефективність очищення цим методом практично не залежить від властивостей частинок забруднень і пов'язана винятково з співвідношенням розмірів цих частинок з розмірами пор фільтрувальної перегородки.

Фільтрування є гідродинамічним процесом, швидкість якого прямо пропорційна різниці тисків, створюваних по обидві сторони фільтрувальної перегородки і обернено пропорційна опору, який створюється рідиною при її русі через пори перегородки і шар утвореного осаду. Різниця тисків створюється за допомогою компресорів, відцентрових насосів і вакуум-насосів, а також за рахунок гідростатичного тиску суспензії.

Однак на роботу фільтрів істотний вплив роблять властивості рідини

(в'язкість, електропровідність, присутність поверхнево-активних речовин і т.п.). Фільтри мають просту конструкцію і можуть експлуатуватися в широкому діапазоні робочих тисків. Їх недоліком є необхідність періодичного відключення для заміни або очищення фільтроелементів.

2.1.2. Фільтрувальні перегородки

Фільтрувальні перегородки є основою процесу фільтрування. Саме вони найбільше впливають на продуктивність, ступінь фільтрування та технологічні особливості фільтрів. Фільтрувальні перегородки мають наступні вимоги [165, 166]:

- фільтрувальна перегородка повинна забезпечувати заданий ступінь фільтрування рідини і при цьому не створювати значного опору потоку;
- фільтрувальна перегородка повинна бути міцною та не руйнуватися під дією потоку. Гнучкі перегородки можуть розтягуватися, але повинні відновлювати початкову форму після зняття навантаження;
- фільтрувальні перегородки повинні бути термостійкими для можливості фільтрування в умовах підвищених температур;
- фільтрувальна перегородка повинна бути корозійностійкою для можливості роботи в агресивних середовищах.

Вимоги, що пред'являються до фільтрувальних перегородок, залежать від способу фільтрування, для якого вони застосовуються. У разі фільтрування з утворенням осаду перегородки повинні мати мінімальну адгезію до осаду. Перегородки, що застосовуються в об'ємних фільтруючих елементах, повинні володіти високою пористістю і їх товщина повинна бути достатньою для затримання якомога більшого числа частинок твердої фази і збільшення тривалості циклу фільтрування.

Частинки твердої фази затримуються не тільки механічно. Дрібні частинки адсорбуються також поверхнею волокон фільтрувальної перегородки. Тому здатність затримувати тверді частинки залежить від фізико-хімічних властивостей перегородки і твердої фази суспензії [167]. Перегородки для поділу суспензії з конкретними фізико-хімічними властивостями вибирають експериментальним шляхом.

Фільтруючі перегородки можуть бути гнучкими або негнучкими. За способом виготовлення гнучкі фільтруючі перегородки підрозділяються на тканинні і нетканинні. До перших відносяться фільтрувальні тканини і сітки. Негнучкі фільтрувальні перегородки підрозділяються на жорсткі, що складаються з пов'язаних між собою елементів, таких як кераміка, пористі метали та пластмаси і нежорсткі, що складаються з не пов'язаних між собою елементів. До останніх відносяться піщані і гравійні фільтри, що застосовуються для очищення води і стічних вод.

У хімічній промисловості найбільшого поширення набули гнучкі тканинні фільтруючі перегородки, які можна застосовувати на механізованих фільтрах. Фільтрувальні тканини виготовляють з різних волокон рослинного або тваринного походження, синтетичних (хімічних) волокон, металів, азбесту, скла. Довгий час основним видом сировини для виготовлення фільтрувальних тканин були натуральні волокна: бавовна, льон, вовна, шовк. Сьогодні широко використовуються тканини з синтетичних волокон. З синтетичного волокна отримують нитки необмежено великої довжини (філоменти), або відрізки (штапельки), відповідні по довжині волокон бавовни і шерсті (30 ... 150 мм). У першому випадку тканина складається з мононитки, або декількох скручених разом ниток (комплексні нитки), у другому - з коротких відрізків отримують спочатку пряжу - нитка необмеженої довжини [168]. Тканини виготовляють з двох систем паралельних ниток розташованих

перпендикулярно один до одного. Нитки, що йдуть в поздовжньому напрямку, називаються основою, в поперечному - утком. Залежно від взаємного розташування ниток можна виготовити безліч тканин різних видів плетіння [169, 170].

Проникність і ступінь очистки тканини залежать від загальної пористості тканини і розміру пор. Розрізняють відкриту пористість, обумовлену будовою (видом плетіння) тканини, і закриту, обумовлену внутрішньою пористістю ниток. Отже, вид нитки (пряжа, комплексні нитки або мононитка) істотно впливає на фільтрувальну здатність тканини. Проникність тканини оцінюється повітряпроникністю і гідравлічним опором. Для оцінки фільтрувальних властивостей тканини більш важливим є визначення її гідравлічного опору. Фільтрувальні властивості тканини можна визначити тільки фільтруванням через неї конкретних суспензій. При цьому слід враховувати, що, крім будови тканини, на ступінь фільтрування великий вплив мають розмір і форма частинок, адгезійні властивості тканини, величина і поляризація поверхні частинки в середовищі суспензії, напрямок потоків при фільтруванні, вміст твердої фази в суспензії і швидкість осадження частинок твердої фази. Фільтрувальні властивості тканини змінюються також і при повторних фільтруваннях через один і той же зразок. Фільтрувальні властивості тканини знижуються головним чином в результаті зменшення розміру пір усередині ниток [171].

Зниження продуктивності фільтрів через засмічення фільтрувальних тканин враховується коефіцієнтом засмічення тканини [145], який приймається рівним 0,7...0,9 залежно від ступеня зниження продуктивності фільтра після 10...15-кратного фільтрування суспензії в однакових умовах через нерегенеровану тканину або при її регенерації в умовах, що імітують процес на зворотному типі фільтра. У ході

регенерації фільтрувальні властивості перегородки зазвичай повністю не відновлюються, у зв'язку з чим опір її зростає, а швидкість фільтрування зменшується. Вивчення кінетики засмічення фільтруючих перегородок можливе або при лабораторних випробуваннях, що складаються з десятків або сотень дослідів на модельній установці, або в результаті тривалих промислових випробувань тканини. Криві кінетики засмічення фільтруючих перегородок, як правило, мають два періоди. У першому періоді спостерігається інтенсивне, а в другому повільне зниження швидкості фільтрування. Іноді в другому періоді швидкість залишається практично незмінною. У першому періоді крива кінетики засмічення описується степеневим рівнянням, у другому - експоненціальним. Число циклів, при якому степенева залежність переходить в експонентну, називається критичним. Для більшості продуктів вона становить 10...40 циклів. Добуток відносних швидкостей фільтрування для обох ділянок кривої кінетики дає вираз для розрахунку коефіцієнта запасу, що враховує засмічення тканини.

Зараз значно зросло виробництво тканин з синтетичних волокон, застосування яких, крім зниження витрати натуральної сировини, дає ряд технологічних переваг. Ці тканини мають більшу корозійну стійкість в агресивних середовищах, ніж тканини з натуральних волокон. Вони мають велику механічну міцність на розрив і стирання. Адгезія осаду до тканин з синтетичних волокон зазвичай нижче, ніж до тканин з натуральних волокон, що полегшує операцію знімання осаду з тканини і покращує умови її регенерації та очищення. Із синтетичних волокон для виробництва фільтрувальних тканин найбільшого поширення набули поліамідні (капрон), поліефірні (лавсан), поліакрілінтрільні (нітрон), поліолефінові (поліпропілен), перхлорвінілові (хлорин), політетрафторетіленові (фторлон), ПВХ. Синтетичні волокна мають

різну корозійну і термічну стійкість [172]. У загальному випадку капронові волокна стійкі в лугах, лавсанові - в кислотах, хлоринові і поліпропіленові є універсальними. Великого поширення набули хлоринові, лавсанові і капронові тканини. Для оснащення патронних фільтрів розроблені і випробувані в промисловості рукавні тканини з лавсанової і капронової пряжі. Обидві тканини показали хороші результати по чистоті фільтрату та міцності, мають незначну адгезію до осаду.

2.1.3. Модель руху рідини через пористу перегородку

Найбільш повний опис процесів, що відбуваються під час фільтрування, можна навести з використанням теорії багатофазних середовищ [173 – 175]. Однак такі математичні моделі для свого вирішення потребують визначення залежності взаємодії фаз, що викликає значні проблеми. Тому, зазвичай, для вирішення прикладних проблем використовують спрощені моделі.

При фільтруванні рідина проходить через пористу перегородку. Фільтрувальну перегородку можна представити як шар зернистого матеріалу, скріпленого між собою або нескріпленого [148, 176 – 178]. Частинки створюють канали складної форми, через які рухається рідина. У рівняння, що описує рух рідини через пористу перегородку, не вводиться число Фруда, так як гравітаційні сили настільки малі у порівняно з силами тертя і тиску, що ними нехтують. Рівняння подібності, що описує рух рідини через пористу перегородку, записане для числа Ейлера, представляють у вигляді:

$$Eu = cRe^n \left(\frac{l}{d_{ек}} \right)^m, \quad (2.1)$$

де Re – критерій Рейнольдса; l – характерний лінійний розмір, м; $d_{ек}$ – еквівалентний діаметр каналу в шарі матеріалу, м; n, m – коефіцієнти.

Для ламінарної області ($Re \leq 35$) залежність (2.1) приймає вигляд:

$$Eu = \frac{110}{Re^{0.25}} \cdot \frac{l}{d_{ек}}, \quad (2.1)$$

а для турбулентної ($70 \leq Re \leq 7000$) прийме вигляд:

$$Eu = \frac{5.8}{Re^{0.25}} \cdot \frac{l}{d_{ек}}. \quad \dots\dots\dots(2.2)$$

У рівняннях (2.1) – (2.3) швидкість потоку фільтрату віднесена до суми площ поперечних перерізів каналу до, так званого, вільного перетину. Рух потоку рідини при фільтруванні буває зазвичай ламінарним, що дозволяє записати рівняння (2.2) в явному вигляді:

$$\frac{\Delta p}{\rho v^2} = \frac{110 \mu}{v d_{ек} \rho} \cdot \frac{l}{d_{ек}} \quad \dots\dots\dots(2.3)$$

Уводячи замість швидкості в каналах v швидкість, віднесену до загальної площі поверхні фільтра v_F , отримують:

$$v_F = v \varepsilon, \quad (2.4)$$

де ε – частка порожнеч в шарі матеріалу, або коефіцієнт вільного об'єму. Підставивши в рівняння (2.4) значення швидкості рідини в каналах, можна отримати рівняння швидкості фільтрування:

$$v_F = \frac{d_{ек}^2 \Delta p \varepsilon}{110 \mu l} \quad \dots\dots\dots(2.5)$$

З рівняння (2.6) випливає, що при інших рівних умовах швидкість фільтрування прямо пропорційна квадрату діаметра каналів в фільтруючому шарі і обернено пропорційна в'язкості рідини μ .

Продуктивність фільтра можна визначити з рівності

$$dV = Fv_F d\tau \quad , \quad (2.6)$$

де V - об'єм фільтрату, м³; F - площа поверхні, що фільтрує, м²; τ - час, с.

Зіставивши рівність (2.7) з основним кінетичним рівнянням (2.6), можна виразити швидкість фільтрування у вигляді:

$$\frac{dV}{Fd\tau} = \frac{d_{ek}^2 \Delta p \varepsilon}{110 \mu l} \quad . \quad (2.7)$$

З останнього рівняння отримуємо опір фільтруючої перегородки в процесі фільтрування

$$R_\phi = l \frac{110}{d_{ek}^2 \varepsilon} \quad \dots\dots\dots (2.8)$$

Відношення в рівнянні (2.9) являє собою опір одиниці товщини шару фільтруючого матеріалу і називається питомим опором фільтрувальної перегородки r_ϕ і визначається з рівняння

$$r_\phi = \frac{110}{d_{ek}^2 \varepsilon} \quad \dots\dots\dots(2.9)$$

Питомий опір фільтруючого шару обернено пропорційний квадрату еквівалентного діаметру каналів в шарі і пористості перегородки.

З рівнянь (2.8) – (2.10) після підстановки отримуємо рівняння

$$\frac{dV}{Fd\tau} = \frac{\Delta p}{l \mu r_\phi} \quad . \quad (2.10)$$

Це рівняння є основним кінетичним рівнянням процесу фільтрування середовищ через шар фільтруючого матеріалу або через фільтруючу перегородку.

2.1.4. Можливості регенерації фільтруючих перегородок

Сучасні технологічні процеси вимагають підвищення довговічності та надійності обладнання. Деяка частина промислового обладнання

працює з використанням різних рідин, що призводить до підвищення їх ступеня очищення та часу безперервної роботи фільтрувальних пристроїв. Тому питання регенерації фільтрувальної перегородки є досить нагальним для сьогодні [179 – 182].

Усі фільтри мають властивість забруднюватись. Процес відбувається наступним чином. Перебіг поділу рідинних сумішей із твердими частинками, які перебувають в тимчасово нерухомому стані (суспензія), із використанням фільтрувальної перегородки супроводжується збільшенням гідравлічного опору у процесі її забруднення. Швидкість фільтрування стає меншою, а вологість осаду більшою. Це є однією з основних причин механічного пошкодження і завчасної заміни фільтрувальних елементів. Для відновлення або покращення характеристик і подальшої роботи фільтрувальної перегородки, зазвичай, намагаються провести її регенерацію [183].

Осад на поверхні фільтрувальної перегородки затримується завдяки перепаду тиску, а також силами когезії між частинками осаду та силами адгезії між осадом і перегородкою. Залежно від співвідношення між абсолютними значеннями сил застосовують різні способи відновлення поверхні фільтрувальної перегородки. При відносно малих значеннях сил адгезії та когезії з'являються розсипчасті опади з малим вмістом вологи, що легко видаляються із поверхні фільтрувальної перегородки за допомогою дії сил тяжіння та відцентрових сил [183].

Регенерацію фільтрувальної перегородки варто проводити періодично в самому фільтрі або із повним демонтажем та розбиранням. Розбирання фільтрувальних елементів та їх промивка дозволяє, зазвичай, отримувати достатньо високу якість очищення фільтра, але вимагає зупинення технологічного обладнання на значний час. На сьогоднішній день регенерації на очисних установках піддають, перш за все,

малогабаритні фільтри з дорогих матеріалів та ті, що встановлюються у фільтрах особливо важливих об'єктів, наприклад, в масляних, паливних і гідравлічних системах літаків [183, 184].

Отже, якість регенерації у великій мірі визначає продуктивність фільтра, що забезпечує можливість його подальшого використання в технологічному процесі. На сьогоднішній день найбільш поширеними є наступні способи очищення фільтрів: механічна регенерація [185], протиточна регенерація фільтрувальної перегородки [186], імпульсна протиточна регенерація [28], струменева регенерація [187], хімічна регенерація пористих перегородок [167], вібраційна регенерація [167, 49], електрогідравлічна регенерація [167], [188], ультразвукова кавітаційна регенерація [89, 189, 190]. Розглянемо та проаналізуємо кожний з них.

2.1.4.1. Механічна регенерація

Основним принципом механічної регенерації [185] є руйнування та видалення скупчень твердих частинок забруднювача, які затримались у порах фільтрувальної перегородки. За умови збільшення товщини шару забруднення поверхні фільтрувальної перегородки згустки великої товщини знімають з полотна за допомогою ножа або під дією розривних зусиль, тобто, натискаючи полотном валика малого діаметра.

Тонші шари осаду знімають шнурами, що у зоні регенерації сходять з барабана, прибирають забруднення і відправляють його завдяки дії вібрації або при обертанні валика [183].

На рис. 2.1 представлена типова схема фільтра з механічною регенерацією, яка працює наступним чином. Забруднена рідина подається через патрубок 4. Після збільшення гідравлічного опору внаслідок засмічення пор фільтрувальної перегородки 2 повертають

ножі 3 ручкою 5 на один або декілька повних обертів з метою зрушення щільних скупчень частинок забруднювача, які осідають в нижній частині фільтру. Фільтрат отримують через патрубок 1 [183].

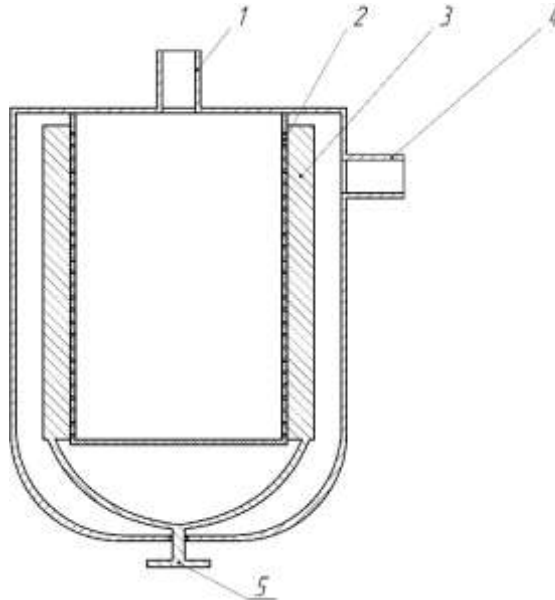


Рис. 2.1 – Схема фільтра з механічною регенерацією

Зазвичай механічна регенерація проводиться в автоматичному режимі при накопиченні певного шару осаду або в ручному режимі з певними інтервалами у часі. Однак, при такому способі регенерації відбувається тільки очищення від великих частинок бруду, що не є допустимим при певних технологічних процесах [183].

2.1.4.2. Протиточна регенерація фільтрувальної перегородки

При протиточній регенерації [186] тверда фаза суспензії, яка затрималась у середині капілярів перегородки фільтра, утворює пористі пробки з нестійким положенням частинок. За умови різких змін швидкості чи напрямку руху рідинного потоку окремі частинки здатні вимиватися, при цьому порушуючи цілісність пробки. В ролі промивного

елемента використовують фільтрат, різні рідини, стиснене повітря, пар. Застосування фільтрату здійснюють у таких випадках:

- фільтрат є малоцінним та його можна прибирати разом з вимитими частками;
- використання інших видів/складів рідин із технологічних міркувань є небажаним;
- фільтрування проводять задля згущення суспензії разом з наступним виділенням твердої фази на фільтрах інших типів.

Використання фільтрату в якості промивної рідини значно спрощує процес регенерації, так як при цьому відпадає необхідність в попередній підготовці фільтра перед промиванням і після неї, яку проводять з метою уникнення змішування суспензії з чужорідною промивної рідиною. Однак, в ряді випадків для відновлення фільтрувальних властивостей перегородки доцільно використовувати спеціальні промивні рідини. Наприклад, при поділі цінної суспензії, коли бажано уникнути навіть невеликих втрат фільтрату, а також при фільтруванні високов'язких суспензій. В останньому випадку при регенерації високов'язким фільтратом можна застосовувати барботаж повітрям. Такий спосіб дозволяє значно інтенсифікувати процес і в якості промивної рідини використовувати низьков'язкий розчинник і стиснене повітря [183].

Стандартна схема фільтрувальної установки з протиточною регенерацією перегородки зображена на рис. 2.2. Установка складається з 2-х основних фільтрів Ф1, Ф2 та групи вентилів В1...В6 [183].

При нормальних умовах брудна рідина проходить через відкритий вентиль В1 до фільтра Ф1, в якому відбувається фільтрування, а далі через вентиль В2 отримуємо очищену рідину. Вентилі В2 та В3 закриті. При роботі фільтра Ф1 на фільтрі Ф2 може відбуватися як процес очищення, так і їх паралельна робота (вентилі В6 та В7 закриті, В5 та В8

відкриті). Під час регенерації фільтра Ф2 через вентиль В7 подається очисник в напрямку, протилежному напрямку подачі суспензії. В ролі очисника може виступати фільтрат, повітря, розчинник та ін. Очисником вимиваються затримані в порах перегородки частки і скидаються в осад, який знаходиться на поверхні.

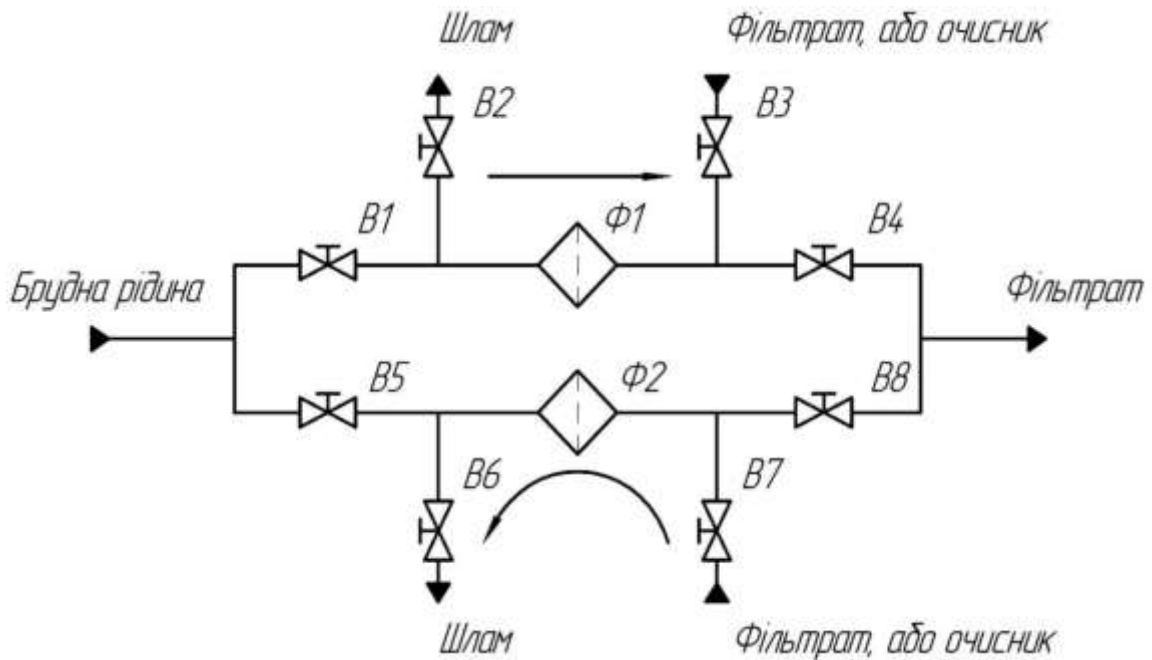


Рис. 2.2 – Схема фільтрувальної установки з протитоочною регенерацією

При цьому утворюється вторинна суспензія, яку залежно від її цінності і технологічних особливостей виробництва, зливають в каналізацію або повторно обробляють. В останньому випадку вторинна суспензія проходить через допоміжний роздільний апарат, у якому очищується від забруднень. У якості допоміжного роздільного пристрою може служити центрифуга, відстійник або додатковий фільтр. Застосування допоміжного фільтра доцільно лише в тому випадку, якщо вторинна суспензія за своїми властивостями помітно відрізняється від вихідної, наприклад, має більш низьку в'язкість. При цьому пропускна

здатність допоміжного фільтра буде в десятки разів більше, ніж основного. Тому фільтр з невеликою поверхнею забезпечить значну тривалість робочого циклу [183].

Допоміжний фільтр застосовують також з метою очищення вторинної суспензії, отриманої при регенерації фільтратом. У такому випадку можна досягти лише грубої очистки. Відповідно, вторинний фільтрат направляють у бак вихідної суспензії для повторного очищення на основних фільтрах [183].

Фільтрувальна установка із протиточною регенерацією перегородки значно спрощується у випадку застосування реверсивного фільтрування. Окремою рисою є позмінна подача суспензії з одного, а потім з іншого напрямку перегородки. Процес фільтрування здійснюється до моменту досягнення граничного значення опору перегородки, після чого відбувається перемикання клапанів фільтра і зміна напрямку подачі суспензії на протилежний. Також у початковий період здійснюється протиточна промивка пористого матеріалу фільтратом та згущена суспензія прибирається із фільтра окремим трубопроводом. Через певний відлік часу клапан виходу згущеної суспензії закривається і відкривається клапан виходу фільтрату та знову починається новий цикл. Отже, реверсивне фільтрування передбачає регенерацію пористих фільтроментів лише фільтратом [183].

Слід зазначити, що протиточною регенерацією перегородок рідко досягається повне відновлення фільтрувальних властивостей. Підвищенню ефективності цього процесу сприяє локалізація ділянок поверхні, які промиваються, а також застосування імпульсної промивки, що значно збільшує затрати як по часу, так і по економічних показниках [183].

2.1.4.3. Імпульсна протиточна регенерація

Для збільшення ефективності регенерації фільтрувальної перегородки здійснюють, так зване, імпульсне промивання [167, 191]. Суть імпульсного промивання полягає у створенні короткочасних різких поштовхів рідини стисненим повітрям або електричним розрядом. Пристрій з імпульсною промивкою фільтрувальних елементів повинен мати у зоні фільтрату ковпак для створення повітряної подушки. При регенерації клапан на вихідному патрубку закривається без вимкнення насоса, який подає суспензію. Отже, фільтрат накопичується під ковпаком та стискається повітрям.

На рис. 2.3 представлена типова схема фільтра з імпульсною протиточною регенерацією [191].

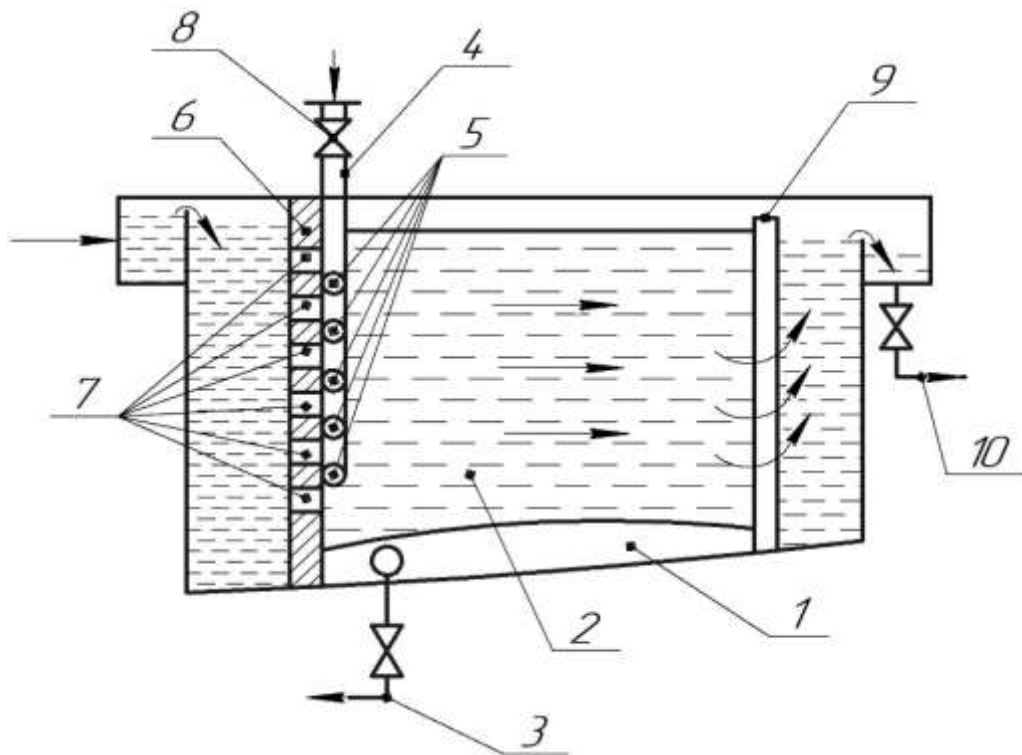


Рис. 2.3 – Схема фільтра з імпульсною протиточною регенерацією [53]

Спочатку скидається осад 1 з горизонтального відстійника 2 по трубопроводу 3. Наступним кроком подається промивна рідина по трубопроводу 4 у систему промивних труб 5, які прикріплені на дірчастій водорозподільній перегородці 6 і розташовані між отворів 7 у перегородці 6. Засувкою 8 зменшується або збільшується витрата промивної рідини, що йде на промивку пористої перегородки 9, яка розташована на виході відстояної рідини з відстійника 2. За рахунок зменшення або збільшення витрати промивної рідини створюється пульсуючий рух рідини в горизонтальному відстійнику 2. За рахунок цього відбувається імпульсна промивка пористої перегородки 9. Промивна рідина скидається по трубопроводу 10 [183]. Зазвичай імпульсна регенерація проводиться із будь-якою промивною рідиною. Однак, при такому способі регенерації мають місце великі витрати промивної рідини. Крім того, кожна пориста перегородка промивається окремо або парами, що в сукупності призводить до суттєвих фінансових витрат [183].

2.1.4.4. Струменева регенерація

Різновидом рідинно-повітряної регенерації фільтрувальної перегородки є струменева регенерація. Вона широко використовується на барабанних, дискових, стрічкових і деяких інших типах фільтрів [187] для видалення осаду з поверхні перегородки та її регенерації. Принцип струменевого промивання наступний. Створені потужні струмені рідини, які спрямовані перпендикулярно або нахилено до поверхні фільтрування (рис. 2.4). Тобто, фільтр складається із корпусу 1, сітчастих конусів 2, які розміщені на певній відстані один від одного, струменеутворюючих промивних пристроїв 3, розміщених всередині сітчастих конусів 2, камер проміжного фільтрування 4, які знаходяться між сітчастими конусами 2,

трубопроводів живлення 5 та підшипників ковзання 6, що утримують порожнистий вал 7 і з'єднують його за допомогою стійок 8 з корпусом 1. Крім цього, конструкція містить патрубок відбору вихідної рідини 9, патрубки відбору твердих забруднюючих частинок 10, патрубки відбору проміжного фільтрату 11 та патрубок відбору кінцевого фільтрату 12.

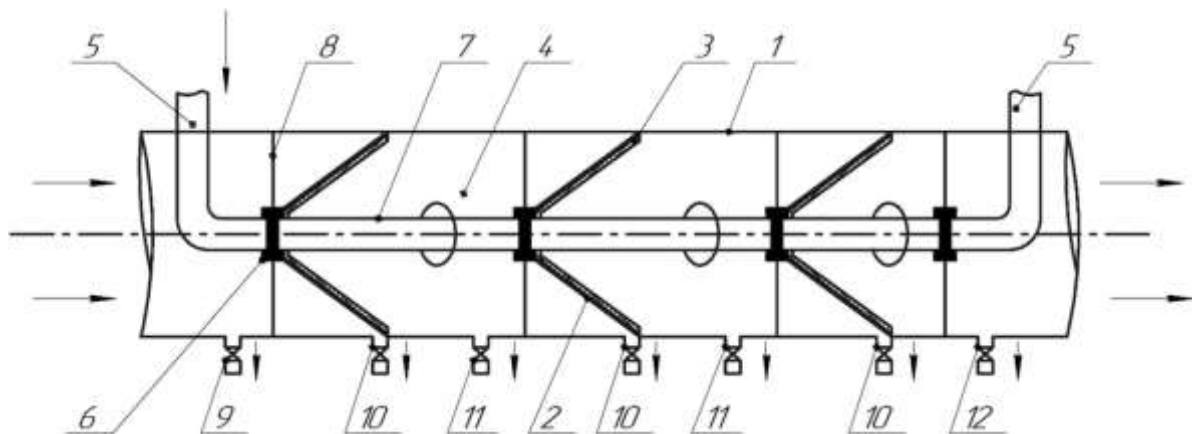


Рис. 2.4 – Схема фільтра з струменевою регенерацією [54]

Такий фільтр працює наступним чином. Забруднена механічними частинками рідина, проходячи через корпус 1, фільтрується на сітчастих конусах 2, залишаючи забруднюючі частинки на їх зовнішній поверхні. Регенерація конусів 2 відбувається під дією напірних струменів, які витікають з отворів струменеутворюючих промивних пристроїв 3, що обертаються в підшипниках ковзання 6. Живлення рідиною промивних пристроїв 3 відбувається від напірного джерела через трубопроводи живлення 5, горизонтальна частина яких є порожнистим валом 7, що обертається в підшипниках 6. Під дією струменів промивних пристроїв 3 і основного потоку рідини в корпусі 1 забруднюючі частинки акумулюються біля великої основи сітчастих конусів. Далі в наслідок дії струменів промивних пристроїв 3, забруднюючі частки обертаються

навколо великих основ конусів 2 і під дією різниці тиску в корпусі 1 і атмосфері через патрубок 10 виводяться на зовні. Через патрубки 9, 11 і 12 здійснюється відбір вихідної рідини, проміжного і кінцевого фільтрату [192].

Якість регенерації в такому випадку залежить, насамперед, від швидкості руху струменів, напрямку подачі промивної рідини, товщини та щільності пористої перегородки. При збільшенні кількості сопел знижується гідравлічний напір промивної рідини, що є небажаним фактором [183].

2.1.4.5. Хімічна регенерація

Дуже часто використаний фільтрувальний матеріал піддають хімічній регенерації [167], яка ґрунтується на розчиненні осілих у перегородці частинок суспензії чи зцементованого осаду. Провідне місце такий спосіб займає при регенерації пористих елементів, які після короткочасної експлуатації довгий час перебували на відкритому повітрі. У такому разі з висохлої рідкої фази суспензії кристалізуються мінеральні солі або створюються плівки органічних речовин, що міцно утримують у порах тверді частинки та повністю перекривають дрібні капіляри. Позбавлення поверхні перегородки захисного шару суспензії може вплинути на її матеріал та призвести до окислення. Придатність до регенерації таких елементів погіршується, отже і відновити їхні фільтруючі властивості можливо лише хімічним способом.

Хімічну регенерацію, як правило, проводять на спеціальних регенераційних установках і в рідкісних випадках - на самому фільтрі [158, 180]. Це пов'язано з використанням як промивної рідини різних кислот, їдких лугів і інших агресивних рідин, які вимагають застосування апаратів зі спеціальних корозієстійких матеріалів. Для обробки тонких

фільтрувальних перегородок, таких, як тканини, сітки, їх занурюють у ванну з промивної рідиною і витримують в ній протягом певного часу. Об'ємні фільтрувальні перегородки (пористі диски, патрони) вимагають продавлювання через них промивної рідини, що пов'язано з необхідністю підведення всередину пористої системи свіжих порцій розчинника, а також механічного вимивання нерозчинної частини забруднювача. Для інтенсифікації процесу хімічну регенерацію можна поєднувати з механічною, перемішуючи розчинник мішалкою і вводячи в систему пульсації, вібраційні і навіть ультразвукові коливання.

Схема пристрою для хімічної регенерації [193] наведена на рис. 2.5.

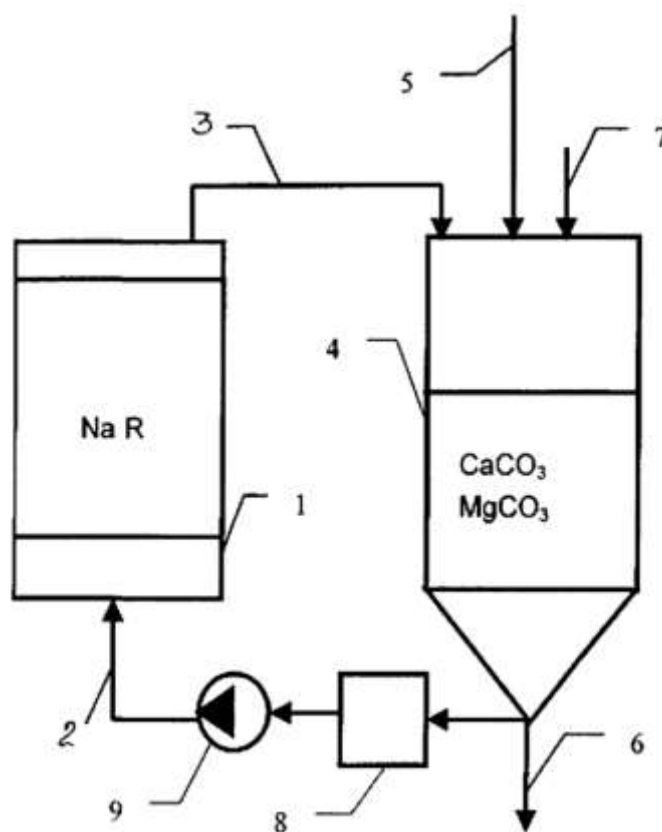


Рис. 2.5 – Схема фільтра з хімічною регенерацією [193]

Натрій-катионітовий фільтр 1 виключають на регенерацію і до нього по трубопроводу 2 подають регенераційний розчин NaCl в кількості 10% від робочої продуктивності фільтру. У процесі регенерації з фільтру по

трубопроводі 3 до реактору 4 виводяться солі жорсткості у вигляді розчинів CaCl_2 і MgCl_2 . До реактору також подають суміш реагентів 5 вапна ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) для коректування pH розчину в межах 8,9-9,3 і соди (Na_2CO_3) для осадження солей жорсткості. Розчин соди додають в кількості 0,8-1,1 до сумарного вмісту іонів кальцію і магнію. У результаті реакцій осаджуються нерозчинні солі жорсткості (CaCO_3 і MgCO_3) у вигляді шламу 6, а отриманий розчин NaCl можна застосовувати для подальшої регенерації фільтру. Безповоротні втрати рідини зі шламом відновлюються розчином NaCl по трубопроводі 7. Шлам можна утилізувати у вигляді міцного будівельного матеріалу. Очищений регенерат збирається в бак 8 і насосом 9, за необхідністю, подається на регенерацію натрій-катіонітових фільтрів. При хімічній регенерації до промивної рідини пред'являють дві основні вимоги: інертність по відношенню до матеріалу фільтрувальної перегородки і здатність розчинити забруднення перегородки. Виходячи з цих вимог, хімічній регенерації найчастіше піддають пористі перегородки з синтетичних матеріалів, кераміки, металокераміки деяких видів. Бавовняні тканини малостійкі до дії кислот, втрачають міцність при лужній обробці, тому хімічна регенерація їх практично неможлива. Тобто, такий спосіб регенерації є досить шкідливим як для людини, так і для матеріалу фільтроелементу, а також є економічно не вигідним [183].

2.1.4.6. Вібраційна регенерація

Використання пружних коливань [188] з метою фільтрування суспензії дозволяє не лише здійснити вібраційну регенерацію перегородки, а також інтенсифікувати і сам процес фільтрування. Якщо суспензії чи перегородці у процесі фільтрування надавати зворотно-поступальний рух, то можна здійснити безперервний процес поділу

суспензії, який протікатиме з найбільшою швидкістю, що визначається тільки початковим гідравлічним опором фільтрувальної перегородки. За період повного коливання (прямий і зворотний хід), який здійснюється суспензією або перегородкою, відбуваються процеси фільтрування та регенерації. При фільтруванні (дія прямого ходу) на поверхні перегородки відкладаються тверді частинки забруднювача. Під час зворотного ходу відбувається протиточна регенерація. Як результат, тверді частинки відриваються від перегородки, а потім несуться потоком суспензії або осідають у нижні частини апарату, де періодично видаляються.

На рис. 2.6 представлена типова схема фільтра з вібраційною регенерацією [194].

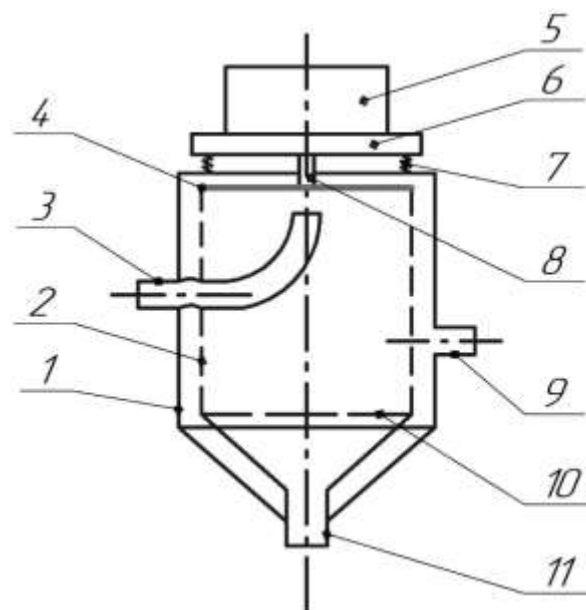


Рис. 2.6 – Схема фільтра з вібраційною регенерацією [194]

Вібраційний фільтр складається з корпусу 1, в якому розташований циліндричний перфорований фільтруючий елемент 2, забірною патрубку 3, який входить в фільтруючий елемент 2 та направлений до верхньої

пластини фільтруючого елемента 4, вібратора 5, який встановлений на платформі 6. Для підтримання платформи встановлені амортизатори 7. Платформа 6 з'єднана з вібратором 5 через шток 8. У нижній частині корпуса фільтра 1 розташований патрубок виведення фільтрату 9. У нижній частині фільтруючого елемента 2 розташована хвилевідбивна сітка 10 та патрубок відводу шламу 11. Фільтр працює наступним чином. Рідина через забірний патрубок 3 під напором поступає в фільтруючий елемент 2, потрапляє на верхню пластину фільтруючого елемента 4 і потік рідини змиває бруд, який знаходиться під цією пластиною, в нижню частину фільтруючого елемента. Умикається вібратор 5, який через шток 8 передає вібрацію на фільтруючий елемент 2. Внаслідок взаємодії верхньої пластини фільтруючого елемента 4 з рідиною виникає стійка хвиля, яка, відбиваючись від хвилевідбивної сітки 10, утворює зворотну хвилю, що дозволяє частині твердих включень суспензії, не потрапляючи на стінку, накопичуватись у нижній частині фільтруючого елемента. Рідина, яка містить різноманітний бруд, проходить через фільтруючий елемент 2 та через патрубок виведення фільтрату 9 подається в напірний трубопровід машини. Бруд, який залишився на фільтруючому елементі, під дією власної ваги осідає в нижній частині фільтруючого елемента, звідки видаляється через патрубок виведення шламу 11 на зовні [183].

2.1.4.7. Електрогідравлічна регенерація

Ще одним видом імпульсної протиточної регенерації фільтрів є електрогідродинамічний спосіб [188]. Завдяки електричному розряду у рідині виникає потужний гідравлічний удар, який обумовлюється миттєвим випаровуванням частини рідкого середовища між іскророзрядниками. Ударна хвиля характеризується зоною підвищеного тиску, слідуючою за нею, зоною пониженого тиску. Відповідно, проходячи

крізь пори фільтрувальної перегородки, вона зрушує щільні скупчення затриманих частинок, проштовхуючи їх спершу до виходу, а потім розтягуючи вздовж капілярів подальшим більш слабким зворотним рухом рідини в зоні зниженого тиску.

Приклад електрогідравлічного пристрою [195] показано на рис. 2.7. Пристрій має електроізолюючі елементи, встановлені в місцях з'єднання з трубопроводом, виконані з діелектричного матеріалу і з'єднані провідником з одним з електродів розрядника. При цьому електрод розрядника електрично з'єднаний з трубопроводом або заземлений.

Пристрій містить фільтр 1, ізольований від трубопроводу 2 електроізолюючими елементами 3, розрядник 4, електроди якого пропущені за допомогою ізоляційної пробки 5 через стінку всередину трубопроводу. Один електрод 6 розрядника з'єднаний з корпусом фільтра проводом високої напруги 7, інший електрод 8 з'єднаний з трубопроводом провідником 9 [183].

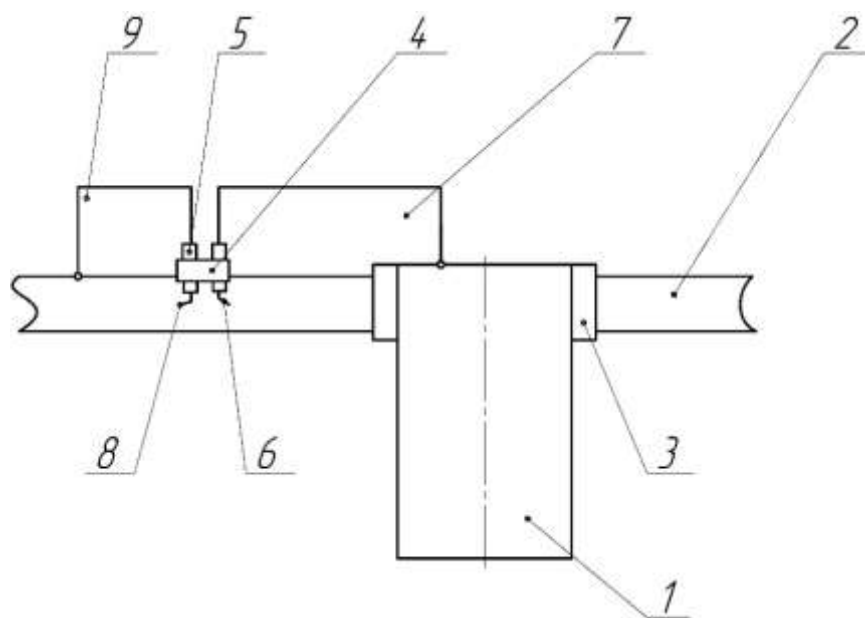


Рис. 2.7 – Схема фільтра з електрогідравлічною регенерацією [195]

При прокачуванні діелектричної рідини по трубопроводу 2 через фільтр 1, в якому відбувається інтенсивна електризація рідини, фільтр накопичує електростатичний заряд, так як має певну електричну ємність в залежності від розміру. Накопичення зарядів на фільтрі відбувається до напруги, достатньої для пробою зазору між електродами 6 і 8. При цьому відбувається розряд через електроди розрядника 4, що створює гідравлічний удар в трубопроводі. Гідравлічний удар викликає виштовхування забруднення з фільтру [183].

Слід відзначити, що багаторазовим повторенням імпульсів при електрогідродинамічному способі регенерації можна повністю зруйнувати капілярні пробки, проте для остаточного вимивання частинок необхідний протиточний рух промивної рідини. Тому такий спосіб регенерації повинен поєднуватися з протиточною промивкою фільтрів. Але основним недоліком є те, що застосування електрогідродинамічного методу можливе тільки для неелектропровідних і не вибухонебезпечних рідин [183].

2.1.4.8. Ультразвукова кавітаційна регенерація

Зі збільшенням частоти пружних коливань можливий перехід у зону ультразвукових коливань, де нижня границя відповідає частоті 20 кГц. Такий перехід характеризується якісним стрибком інтенсивності регенерації [196]. Відомо [189, 197, 198], що разом із поширенням ультразвукових коливань в рідині спостерігається явище ультразвукової кавітації [89]. Воно являє собою утворення дрібних бульбашок при проходженні хвилі розрідження. Такі бульбашки здійснюють пульсуючі коливання і викликають сильну місцеву турбулізацію середовища. Частина цих бульбашок при проходженні другої фази хвилі, які створює стиснення, сплескуються і це призводить до виникнення значних

місцевих температур та тисків. Все це є потужним фактором руйнування твердих частинок на стінках капілярів перегородки та вимивання їх проточною рідиною.

Зазвичай ультразвуковій регенерації піддають сітчасті фільтри [190], які мають незначний гідравлічний опір і дозволяють досягати великої продуктивності при невеликій поверхні фільтрування.

Пристрій, що здійснює ультразвукову кавітаційну регенерацію фільтроелементів [199] наведено на рис. 2.8.

У горизонтальну циліндричну камеру встановлюють фільтроелемент, який обертається від електроприводу 4. У камеру 8 подається кранами 9 і 10 очищаюча рідина від відцентрового очисника рідини. На ультразвукові випромінювачі 2 надходить напруга від ультразвукового генератора 3.

Фокусуючий ультразвуковий випромінювач дозволяє створити необхідну інтенсивність ультразвуку на поверхні фільтроелемента малою потужністю генератора без втрат на кавітацію у поверхні випромінювача і в контактному шарі рідини, яка очищається.

У результаті, завдяки малому загасанню ультразвукових коливань у циліндричній камері 8 на поверхні фільтроелемента у формі смуги, витягнутої вздовж осі фільтроелемента, створюється практично синфазний фронт необхідної інтенсивності ультразвуку для очищення фільтроелемента.

При цьому ультразвук руйнує скупчення забруднювача на поверхні і у порах фільтроелемента. Електроклапан 11 періодично закривається. У момент відкриття електроклапана над поверхнею фільтроелемента створюється ударна хвиля перепаду тиску (відсмоктування) і потік, що створений рідиною, виконує ефективне очищення поверхні та пір фільтроелемента від забруднень.

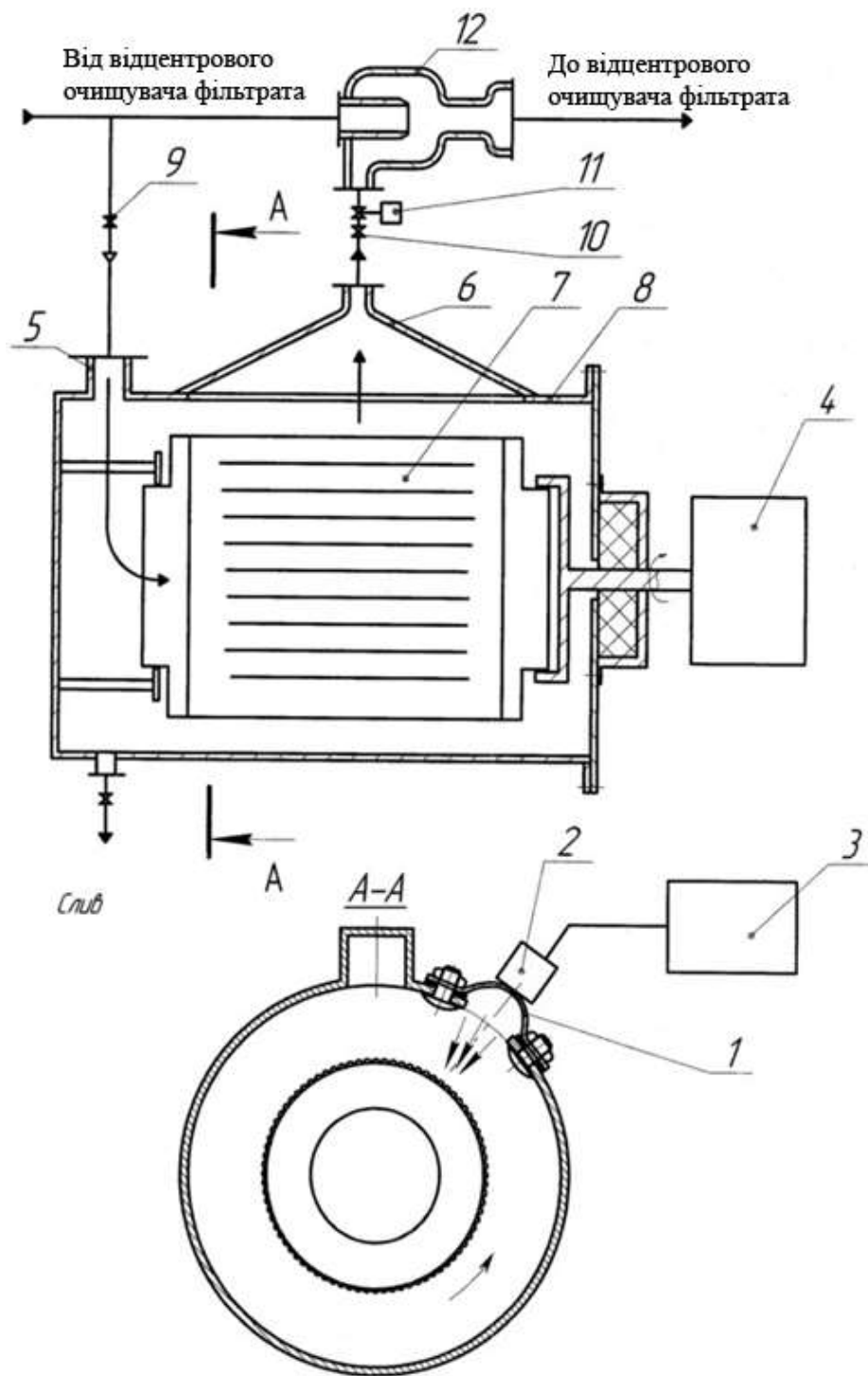


Рис. 2.8 – Схема фільтра з ультразвуковою кавітаційною регенерацією [199]

Головними факторами, які впливають на якість ультразвукової регенерації є тривалість озвучування, відстань до випромінювача та

інтенсивність коливань. Необхідна тривалість озвучування залежить від параметрів властивостей суспензії, процесів фільтрування та регенерації перегородки, яка коливається від кількох секунд до десятків хвилин.

Ультразвуковий спосіб регенерації фільтрувальної перегородки є одним з найбільш ефективних способів гідромеханічного відновлення пористої перегородки [41, 200]. Таким способом можна очищати фільтроелементи зі ступенем очищення 1 мікромметр [201]. Однак, суттєвим недоліком ультразвукової регенерації є її значна енергоємність. Крім того, при поширенні в середовищі звук відбивається, заломлюється, розсіюється і поглинається, що характерно для будь-якого хвильового руху. Тому обробка ультразвуком товстих фільтрувальних перегородок недоцільна. Крім того, разом з швидким загасанням ультразвукових коливань в пористому середовищі зменшується ефективність регенерації по глибині перегородки.

2.1.5. Застосування ультразвукових коливань в технології фільтрування рідини

Для видалення з рідини завислих частинок забруднювача відоме використання ультразвукового поля, яке штучно створюється в обмеженому об'ємі корпусу фільтра [13, 202]. Застосування ультразвукових коливань в процесі фільтрування дозволяє досягти високого рівня якості очищення рідини, суттєво підвищує продуктивність технологічного процесу і, головне, дозволяє реалізувати ефект самоочищення фільтрувального елемента. Додатково зазначений спосіб фільтрування забезпечує знезараження технологічної рідини від шкідливих та небезпечних мікроорганізмів [130].

Відомі декілька варіантів побудови ультразвукових фільтрів (УЗФ)

[89, 92, 203 – 207]. Враховуючи новітні розробки та технічні пропозиції останніх років, представлену в роботах [89, 208] класифікацію УЗФ, можна скорегувати та доповнити (рис. 2.9).

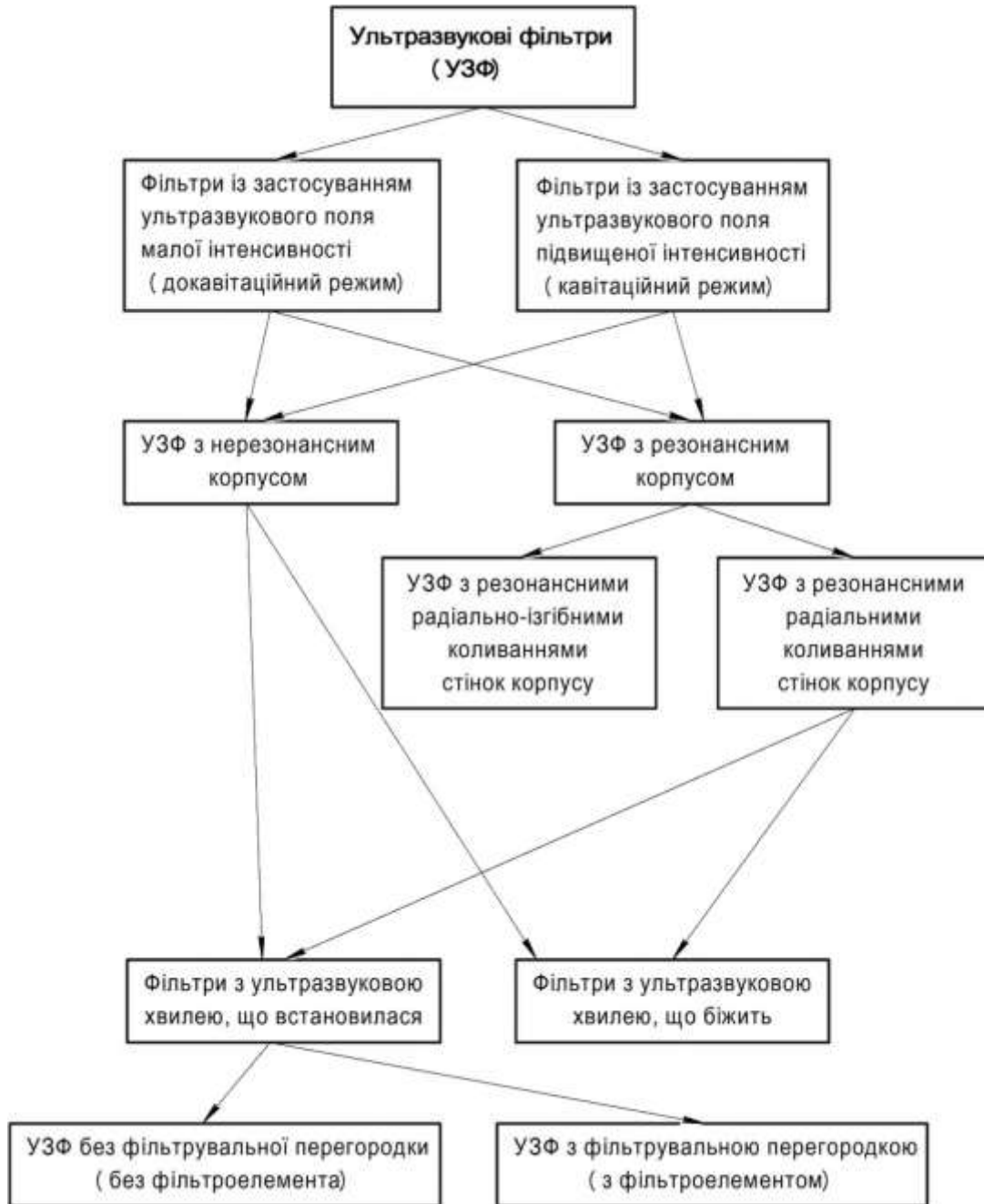


Рис. 2.9 – Класифікація ультразвукових фільтрів

Перш за все, УЗФ можна поділити залежно від інтенсивності

ультразвукового поля, що застосовується. Реалізація УЗФ можлива як із застосуванням ультразвукових коливань, інтенсивність яких не досягає порога виникнення явища ультразвукової кавітації, так і з застосуванням ультразвукових коливань, інтенсивність яких перевищує поріг виникнення кавітації, тобто коли звуковий тиск в хвилі деформації дорівнює або перевищує тиск насичених парів за даних умов. УЗФ з докавітаційним режимом доцільно використовувати при фільтруванні біологічних рідин, в яких в процесі фільтрування необхідно зберегти стан та активність мікробіологічної складової [209]. УЗФ з кавітаційним режимом забезпечують не лише фільтрування від механічних домішок, а і здійснюють вплив на мікроорганізми та бактерії в технологічних рідинах та здатні активувати ці рідини, впливаючи на них на молекулярному рівні [26, 209 – 213].

Ультразвукові коливання в рідину можна вводити безпосередньо з випромінюючої поверхні ультразвукового перетворювача (рис. 2.10).



Рис. 2.10 – Ультразвукове технологічне обладнання з нерезонансним корпусом

У цьому випадку коливання корпусу фільтру не регламентуються, а

інтенсивність коливань задається площею торцевої поверхні ультразвукового перетворювача та амплітудою коливань цієї поверхні. Корпуси подібного технологічного обладнання виконуються із тонкого матеріалу і розраховані на малий статичний тиск.

П'єзоелектричні перетворювачі для подібних пристроїв виготовляються за акустичною 1/2-хвильовою схемою і не використовують акустичні трансформатори швидкості, тобто є малоамплітудними випромінювачами (рис. 2.11) [26].



Рис. 2.11 – Малоамплітудні 1/2 - хвильові ультразвукові випромінювачі

Амплітуда коливань випромінюючої поверхні в цьому випадку становить приблизно 3...5 мкм. Зазвичай цей спосіб уведення в рідину ультразвукових коливань застосовують в очисних ваннах з малою інтенсивністю ультразвуку (до 8...10 Вт/см²) [214]. У таких ультразвукових пристроях як в доквітаційному режимі, так і в квітаційному режимі, але малої інтенсивності, ультразвукові хвилі вводяться в рідину з незначними втратами, тобто вдається досить якісно узгодити роботу випромінювача з рідинним навантаженням. Удається це завдяки відсутності, за таких умов, на випромінюючій поверхні квітаційного двофазного прошарку, який поглинає та розсіює ультразвук [215].

При малому рівні інтенсивності ультразвукових коливань процес

очищення технологічної рідини відбувається за рахунок поступового руху частинок забруднювача в зони пониженого тиску, які утворюються в пучностях хвилі деформації, що встановилася. Концентрація частинок в зонах пониженого тиску призводить до їх коагуляції та осадженню під дією сил гравітації в шламосбірник (рис. 2.12).

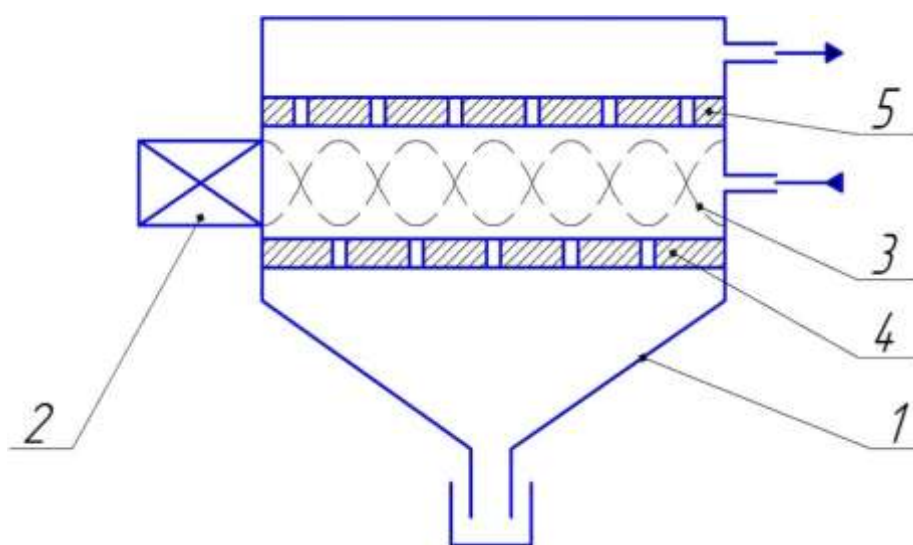


Рис. 2.12 – УЗФ без фільтроелементу (1 – корпус; 2 – ультразвуковий випромінювач; 3 – ультразвукова хвиля, що встановилася; 4 – перегородка з отворами для осаджування забруднювача; 5 – перегородка з отворами для відводу фільтрату)

У подібному технічному рішенні УЗФ важливо забезпечити паралельність поверхонь випромінювання та відбиття. Розмір корпусу в напрямку випромінювання необхідно виконати резонансним. Важливо, що застосування фільтроелементу в даному випадку не є обов'язковим.

Якщо виникає необхідність створити УЗФ з хвилею деформації, що біжить, протилежну до робочої поверхні випромінювача відбиваючу стінку роблять м'якою, здатною поглинати пружні коливання [89].

У разі необхідності побудови УЗФ з більшою інтенсивністю ультразвукового поля зазвичай застосовують збільшення амплітуди

коливань поверхні випромінювання за рахунок застосування акустичних трансформаторів швидкості, наприклад, ступінчастого типу [92].

Але збільшення амплітуди коливань призводить до утворення на поверхні випромінювання кавітаційного прошарку, який знижує ефективність введення в рідину ультразвукових хвиль (рис. 2.13) [26].

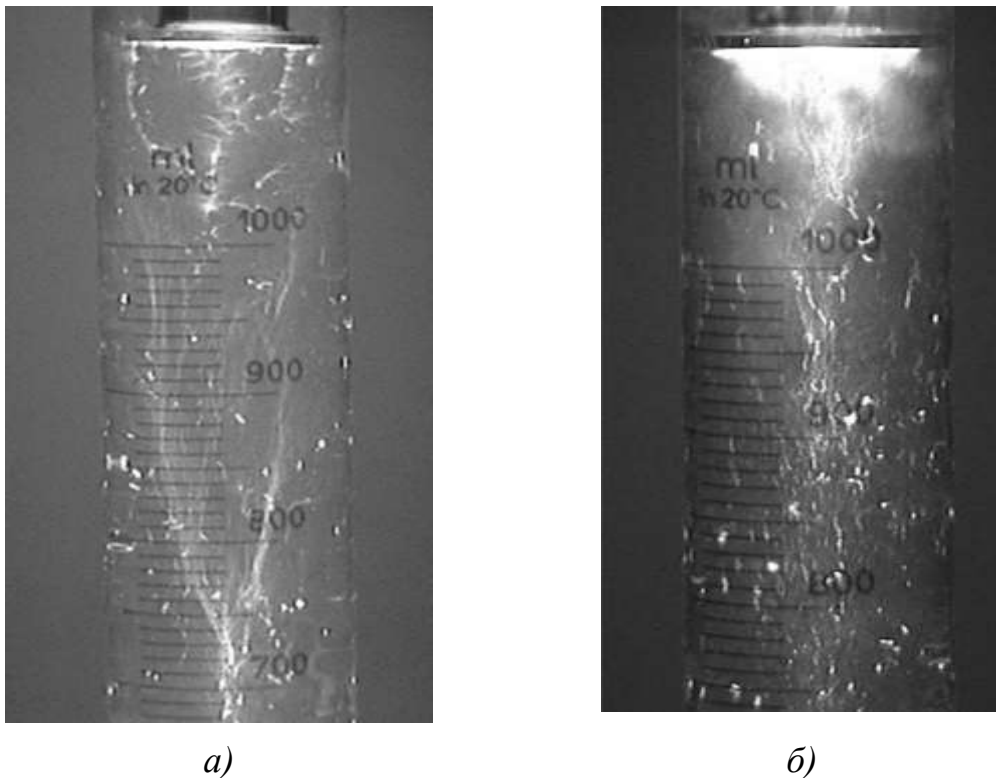


Рис. 2.13 – Візуалізація процесу утворення кавітаційного прошарку на поверхні випромінювання (а- мала інтенсивність ультразвуку; б- збільшення інтенсивності ультразвуку до 30 Вт/см^2)

Уникнути цієї проблеми вдається за рахунок збільшення площі поверхні випромінювання при збереженні споживаної випромінювачем потужності. Подібні високоамплітудні ультразвукові кавітатори можуть виконуватися з багатодисловою розвиненою поверхнею випромінювання (рис. 2.14) або завдяки виконанню корпусу фільтра резонансним.



Рис.2.14 – Високоамплітудний ультразвуковий випромінювач з розвиненою багатодисковою поверхнею випромінювання

При цьому корпус, зазвичай, виконують трубчастим циліндричним і збуджують в ньому радіально-згинальні або радіальні резонансні пружні коливання (рис. 2.15) [204].

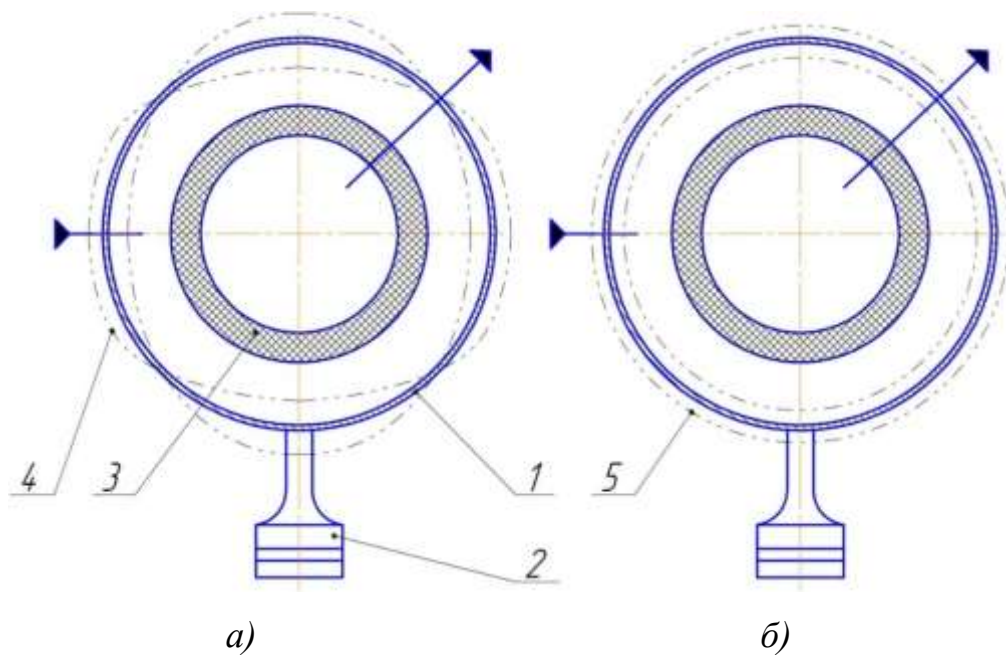


Рис. 2.15 – УЗФ з резонансним корпусом (а – зі збудженням радіально-згинальних коливань; б – зі збудженням радіальних коливань) (1 – циліндричний корпус фільтра; 2 – ультразвуковий привід поздовжніх переміщень; 3 – фільтроелемент; 4 – радіально-згинальна хвиля деформації; 5 – радіальна хвиля деформації)

У разі збудження радіально-згинальних коливань в заповненому рідиною корпусі утворюється, так зване, дифузне поле, в якому перемішані вузли та пучності. У цьому випадку в корпусі утворюється досить рівномірне середнє за інтенсивністю ультразвукове поле (рис. 2.16) [89].

При збудженні радіальних коливань циліндричного корпусу фільтра в рідині вздовж осі відбувається суттєве збільшення інтенсивності звукового поля за рахунок фокусуючих властивостей поверхні випромінювання (рис. 2.17) [120].

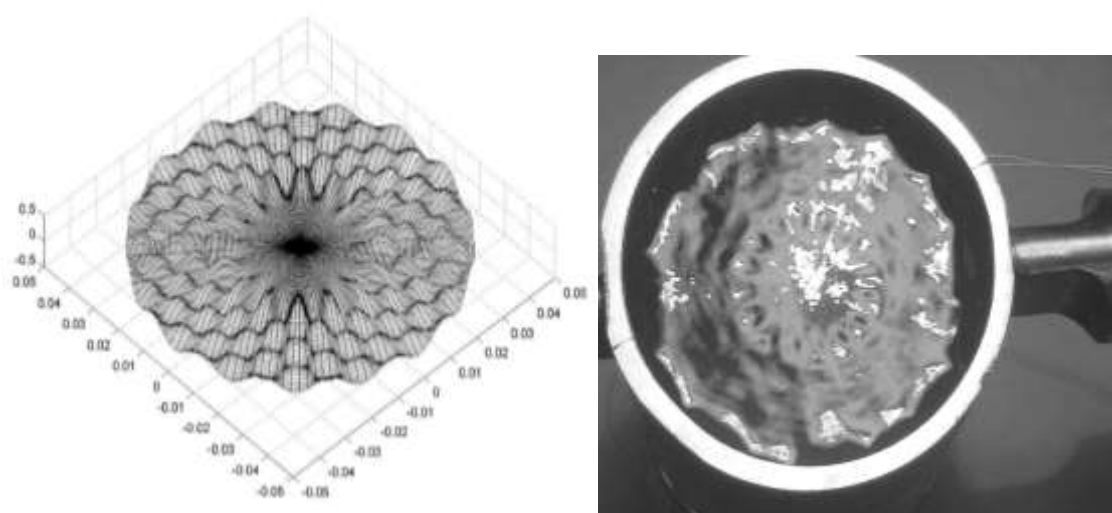


Рис. 2.16 – Форма ультразвукового поля в циліндричному корпусі при збудженні резонансних радіально-згинальних коливань

Висока інтенсивність ультразвукового поля в цьому випадку дозволяє досягти нової якості процесу фільтрування, що пов'язано з можливістю інактивації широкого спектру мікроорганізмів та бактерій в розвиненому кавітаційному середовищі.

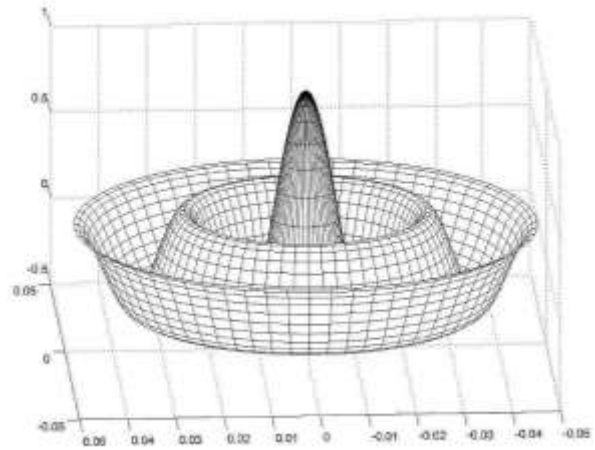


Рис. 2.17 – Концентрація ультразвукового поля в циліндричній камері при збудженні радіальної моди коливань

Товстостінний корпус фільтра в подібному технічному рішенні дозволяє застосувати такі УЗФ в гідросистемах з підвищеним тиском.

Розміщення в утвореному кавітаційному середовищі фільтрувального елемента дозволяє надати процесу фільтрування нові можливості, що пов'язано з ефектами, які супроводжують явище ультразвукової кавітації. При коливаннях та сплескуванні кавітаційних бульбашок утворюються інтенсивні мікротечії, виникають ударні хвилі та енергоємні кумулятивні струмені [216], які активно руйнують частинки забруднювача і не дозволяють засмічуватися порам фільтроелементу, реалізуючи ефект самоочищення фільтроелементу. Високочастотний коливальний процес в рідинному середовищі призводить до зменшення поверхневого тертя у порах фільтроелементу, що дозволяє підвищити продуктивність процесу фільтрування та підвищити його якість. Подібні нові можливості процесу фільтрування дозволяють застосувати УЗФ не тільки в технологічних гідросистемах підвищеного тиску, а і при біологічному та механічному очищенні стічних вод [132, 217 – 219].

Використання ультразвукової кавітації для очищення фільтрувальних перегородок є перспективним. Вказана технологія може підвищити ефективність багатьох технологічних процесів в різних галузях промисловості, медицини та сільського господарства.

Але для забезпечення ефективної та довготривалої роботи запропонованого ультразвукового кавітаційного фільтра з ефектом самоочищення необхідно вирішити наступні проблеми:

- здійснити аналіз основних способів очищення рідин методом фільтрування;
- розробити математичну модель процесу взаємодії засміченої рідини з фільтроелементом в умовах ультразвукової кавітації;
- запропонувати та впровадити технічне рішення ультразвукового кавітаційного фільтра з ефектом самоочищення та розробити методику розрахунку ультразвукового кавітаційного фільтра з ефектом самоочищення;
- експериментально підібрати кавітаційно стійкі конструкційні матеріали для виготовлення елементів фільтра, здатного тривалий час працювати в умовах кавітаційного середовища;
- розробити рекомендації стосовно режимів збудження акустичної системи фільтра та раціонального розміщення фільтрувального елемента в кавітаційній камері.

2.2. Моделювання процесу фільтрування рідини в ультразвуковому кавітаційному середовищі

Для вирішення проблем забезпечення ефективної безперебійної роботи ультразвукового кавітаційного обладнання для очищення рідини необхідно визначити, як буде вести себе частинка забруднювача в ультразвуковому кавітаційному середовищі та що відбудеться при її

ударі по поверхні фільтрувальної перегородки.

2.2.1. Математична модель процесу руху частинки забруднювача в умовах ультразвукової кавітації

У разі випромінювання у воду плоскої звукової хвилі частотою 22 кГц середнього рівня інтенсивності, при якому кавітаційні явища вже присутні, але ще слабо виражені, уздовж прозорої склянки з резонансним поздовжнім розміром, одержувана форма поля, представлена на рис. 2.18.

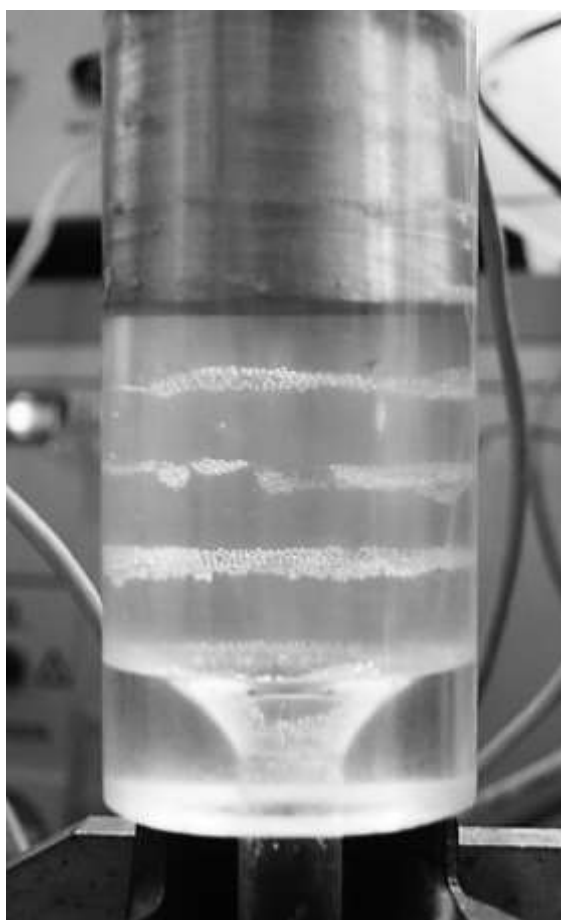


Рис. 2.18 – Ультразвукове поле плоскої стоячої хвилі в технологічному об'ємі

На рис. 2.18 добре видно, що на випромінюваній поверхні ультразвукового перетворювача ще не спостерігається двофазний

кавітаційний прошарок, який призводить до поглинання і розсіювання ультразвукової енергії. Уздовж склянки встановлюється стояча хвиля деформації, в пучностях якої накопичуються кавітаційні бульбашки. Відстань між прошарками бульбашок становить $\frac{1}{2}$ довжини хвилі. Бульбашки утворюються внаслідок періодичного стиснення і розрідження в звуковій хвилі деформації.

Кавітаційні бульбашки утворюються із зародків кавітації, в якості яких можуть виступати незмочувані тверді частинки, мікробульбашки нерозчинених газів, що знаходяться в мікротріщинах на незмочуваних твердих, межуючих з рідиною, поверхнях і т.п. Кавітаційні парогазові бульбашки збільшуються в розмірах у фазі розрідження і сплескуються в фазі стиснення звукових хвиль після здійснення одного або декількох коливань [88, 220].

Мінімальний розмір зародків, здатних викликати ультразвукову кавітацію, повинен бути вище критичного розміру [88, 221]:

$$R_{кр} = \sqrt{3}R_0 \left[\frac{R_0}{2\sigma} \left(p_0 + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \right]^{1/2}, \quad ..(2.2.1.12)$$

де σ – коефіцієнт поверхневого натягу; R_0 – початковий радіус бульбашки; p_0 - гідростатичний тиск. Наведений вираз справедливий за умови, що тиск насичених парів дуже малий в порівнянні з амплітудним звуковим тиском.

Максимальний розмір зародків, здатних викликати ультразвукову кавітацію, відповідає їх резонансним розмірам, при яких їх власна частота дорівнює частоті, введеної в рідину, звукової хвилі. Резонансний розмір зародка і частота коливань пов'язані залежністю [88, 221]:

$$(2\pi f)^2 = \frac{3\gamma_a}{\rho R_{рез}^2} \left(p_a + \frac{2\sigma}{R_{рез}} \right), \quad (2.2.1.13)$$

де f – частота звукових коливань; $R_{рез}$ – резонансний розмір зародка; γ_a – показник адіабати; ρ – щільність незбуреної рідини; p_a - звуковий тиск, що створюється звуковим полем.

У стоячій звуковій хвилі парогазові бульбашки, які мають розміри менше $R_{рез}$, пульсують в фазі з коливаннями тиску і зміщуються до пучностей тиску, а при розмірах, що перевищують $R_{рез}$, переміщуються до вузлів тиску. Швидкість руху бульбашок визначається залежністю [92]

$$v_{пер.вуз} = \frac{R_0^2}{10\mu \left(p_0 + \frac{4\sigma}{3R_0} \right)} p_a \frac{\partial p_a}{\partial x_k}, \dots\dots\dots(2.2.1.14)$$

Трансляційний рух бульбашок до вузлів тиску стоячої звукової хвилі призводить до коагуляції бульбашок в цих зонах, тобто до збільшення їх розмірів. Такі великі бульбашки, перебуваючи в зоні з практично нульовим звуковим тиском, не сплескуються. Саме такі прошарки бульбашок і спостерігаються візуально на експериментальних фотографіях звукового поля плоских стоячих хвиль (рис. 2.19а та рис. 2.19б).

Тестова алюмінієва фольга, розміщена в кавітаційній камері нормально до випромінюючої поверхні ультразвукового перетворювача, показує відсутність кавітаційної ерозії фольги в перетинах, що відповідають вузлам тиску в стоячій хвилі (рис. 2.19б).

У пучностях хвилі тиску, де скупчуються бульбашки розміром менше $R_{рез}$, внаслідок чергування фаз стиснення і розрідження бульбашки, зробивши одне або кілька коливань і накопичивши при цьому енергію, сплескуються з утворенням ударних хвиль, які призводять до ерозійного руйнування тестової фольги (рис. 2.19б).

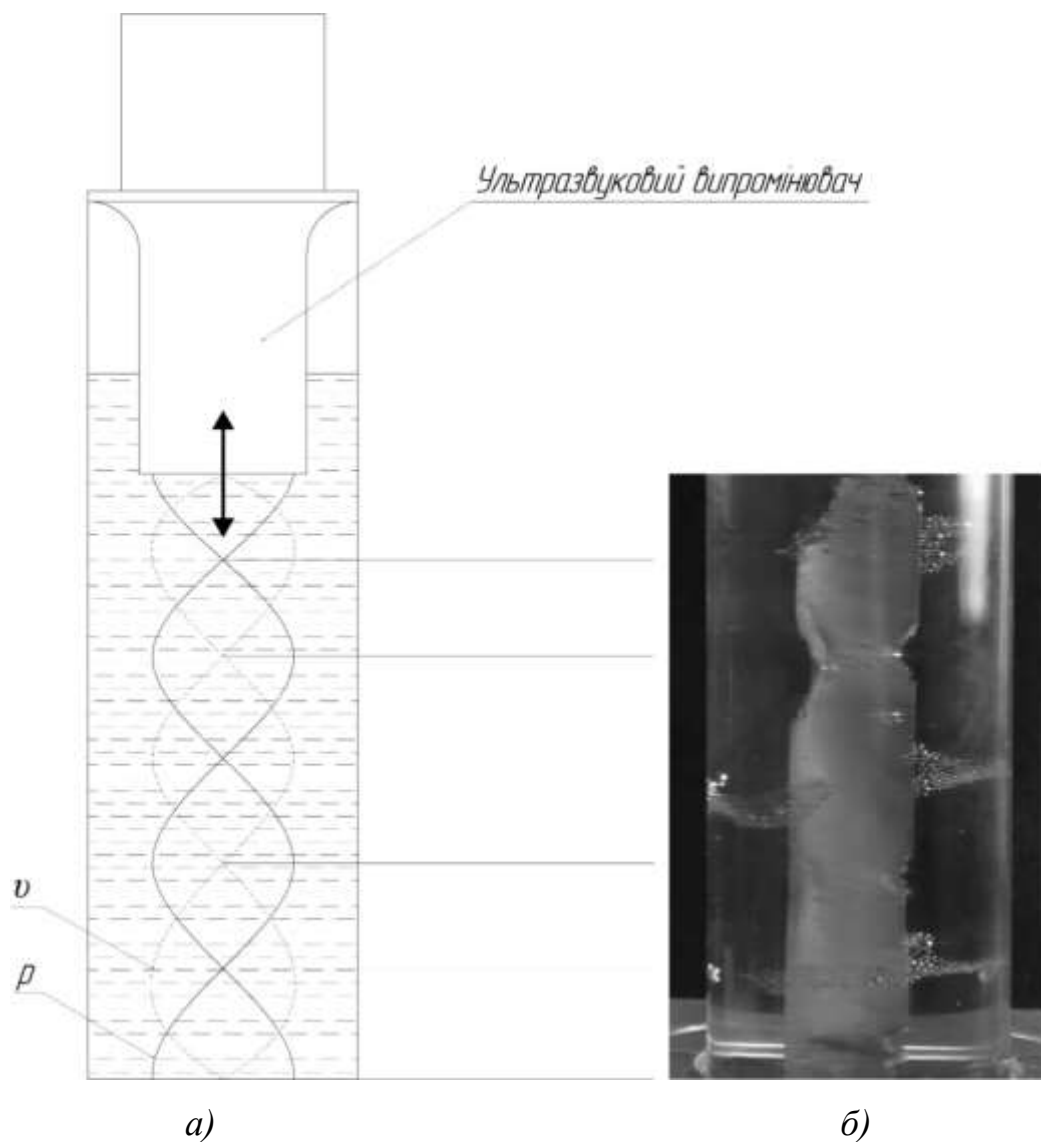


Рис. 2.19 – Схема розміщення ультразвукового поля плоскої стоячої хвилі (а) і фотографія кавітаційної ерозії тестової алюмінієвої фольги в місцях, відповідних пучностям тиску (б)

Тестова фольга на рис. 2.19б додатково показує, що максимальна інтенсивність ерозійного руйнування спостерігається поблизу випромінюючої поверхні ультразвукового перетворювача. По мірі віддалення пучностей тиску від випромінюючої поверхні інтенсивність кавітаційної ерозії зменшується, що пояснюється втратами ультразвукової енергії при проходженні хвилі через двофазні кавітаційні

прошарки, які поглинають і розсіюють ультразвукову енергію [222].

Зважена частка забруднювача рідини, опинившись біля кавітаційної бульбашки, зазнає або вплив потоку рідини від рухомої з великою швидкістю стінки бульбашки, або вплив ударної хвилі при сплескуванні бульбашки. Для випадку сферичної форми частинки забруднювача рівняння її руху в рідині може бути представлено у вигляді [223, 224]:

$$m \frac{dv}{dt} = \frac{\pi K_{\text{опору}}}{8} \rho d^2 (U - v)^2, \quad (2.2.1.15)$$

де m – маса частинки забруднювача; v – швидкість руху частинки; U – швидкість руху стінки кавітаційної бульбашки; $K_{\text{опору}}$ – коефіцієнт лобового опору; d – діаметр частинки. Згідно з результатами роботи [225] характер зміни швидкості руху стінки кавітаційної бульбашки має вигляд, представлений на рис. 2.20.

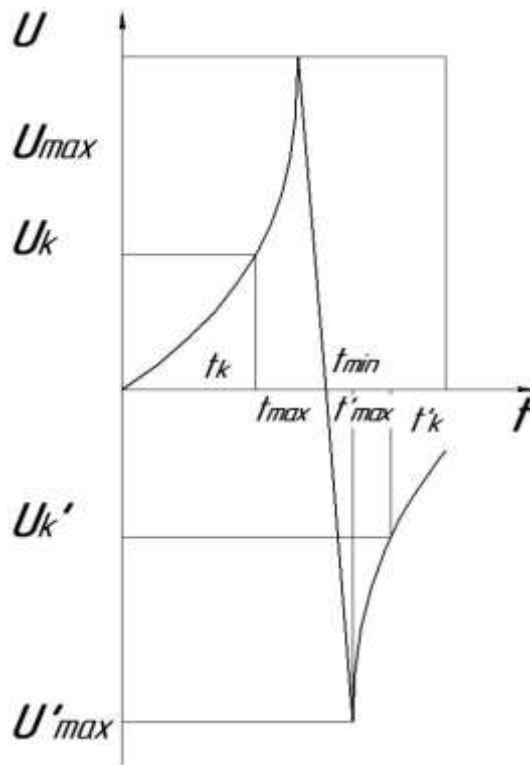


Рис. 2.20 – Характер зміни швидкості руху стінки кавітаційної бульбашки в фазі стиснення і в фазі розрідження

З рисунку слідує, що стиснення бульбашки відбувається за законом, близьким до експоненціального. Різке зростання швидкості починається з деякого критичного значення U_k . Досягнувши значення U_{max} при вже мінімальному розмірі бульбашки, швидкість падає до 0. За даними роботи [226] характер зміни швидкості стінки кавітаційної бульбашки в фазі розрідження є симетричним відображенням фази стиснення.

Для випадку утворення кавітаційної бульбашки у в'язкій стисливій рідині при введенні в неї ультразвукової хвилі швидкість руху стінки бульбашки можна описати [227]:

$$\begin{aligned}
 & R \left(1 - \frac{2U}{c_p} \right) \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(1 - \frac{4U}{3c_p} \right) \left(\frac{dR}{dT} \right)^2 + \\
 & + \frac{1}{\rho} \left[p_0 - p_n - p_a \sin \omega t + \frac{2\sigma}{R} + \frac{4\mu U}{R} + \left(p_0 + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma} \right] + \\
 & + \frac{RU}{\rho c_p} \left(1 - \frac{U}{c_p} \right) \frac{dp(R)}{dR} = 0
 \end{aligned} \quad (2.16)$$

де p_n – тиск насиченого пару; $U = \frac{dR}{dt}$ – швидкість схлопування бульбашки; c_p – швидкість звуку в незбуреній рідині; $\omega = 2\pi f$ – колова швидкість коливань; γ - показник політропи.

Рішення рівняння **Error! Reference source not found.**16) для випадку утворення кавітаційної бульбашки проведено при значеннях, представлених в табл. 2.1. Результати розрахунку представлені у вигляді графічних залежностей на рис 2.21.

Вважаючи рух стінки кавітаційної бульбашки на ділянці $t_{max} - t_k$ рівноприскореним, рівняння (2.2.1.15) можна переписати у вигляді:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{\pi K_{опору} \rho d^2}{8m} (at - v)^2, \quad (2.17)$$

де $K_{опору} = 0,8$; a - прискорення руху частинки забруднювача.

Таблиця 2.2.1.1 – Початкові значення, використані при моделюванні динаміки кавітаційної бульбашки

	$f, \text{кГц}$	$t, \text{°C}$	$\mu, \frac{\text{Н} \cdot \text{сек}}{\text{м}^2}$	$\rho, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$\sigma, 10^{-3} \cdot \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$	$p_0, \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$	$p_n, \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$	$p_a, \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$	$R_0, \text{м}$
Вода	22	20	0,001	1000	74	$4 \cdot 10^6$	2300	$4 \cdot 10^6$	$3,2 \cdot 10^{-6}$
Бензин	22	20	0,0005	750	21	$4 \cdot 10^6$	66000	$4 \cdot 10^6$	$3,2 \cdot 10^{-6}$
АМГ-10	22	20	0,51	850	28,9	$4 \cdot 10^6$	-	$4 \cdot 10^6$	$3,2 \cdot 10^{-6}$

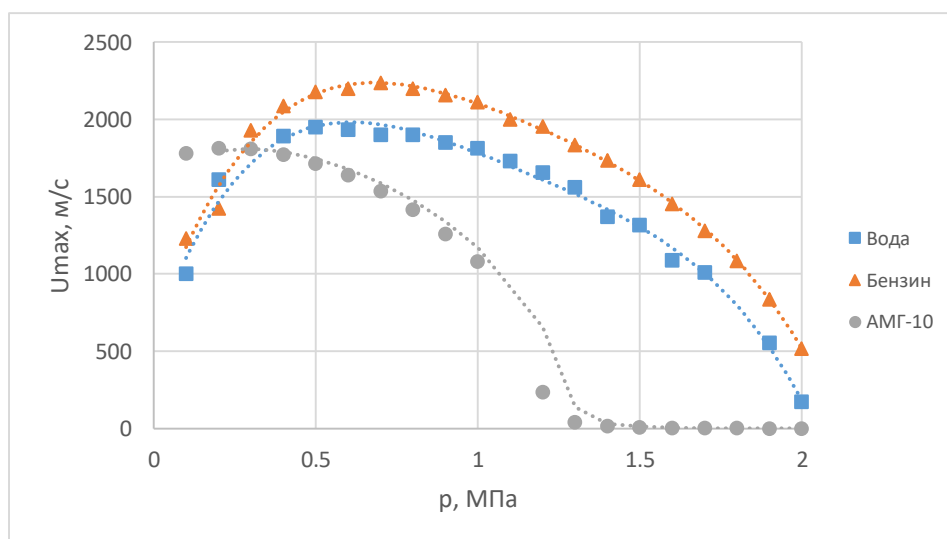


Рис. 2.21 – Залежність швидкості руху стінки кавітаційної бульбашки у фазі стиснення від статичного тиску в рідині

Інтегруючи отриманий вираз в межах від 0 до $t_{max} - t_k$, отримаємо [154]:

$$v = a\tau + \sqrt{\frac{a}{A}} \cdot \frac{1 - e^{2\sqrt{aA}\tau}}{1 + e^{2\sqrt{aA}\tau}} , \quad (2.18)$$

$$d\bar{e} = t_{max} - t_k, \quad A = \frac{\pi K_{опору} \rho d^2}{8m} .$$

Результати розрахунку швидкості руху частинки забруднювача [228]:, що знаходиться біля стінки пульсуючої кавітаційної бульбашки, виконані за виразом (2.18), представлені у вигляді графіків на рис. 2.22. Отримані результати свідчать про можливість досягнення частинками забруднювача надзвукової швидкості переміщення в рідині.

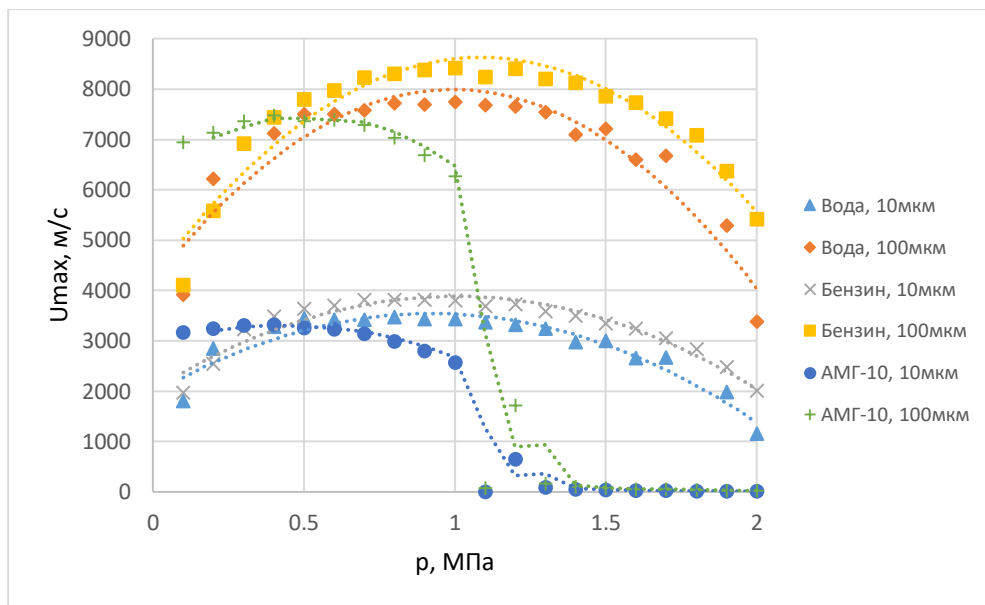


Рис. 2.22 – Залежність швидкості руху частинок забруднювача різної маси і розмірів, що знаходяться в кавітаційному середовищі біля стінки бульбашки

За умови сталості швидкості руху стінки кавітаційної бульбашки і її рівності середньоарифметичним значенням, можна визначити шлях, який частинка забруднювача пройде на ділянці $t_{max} - t_k$ з надзвуковою швидкістю, записавши рівняння (2.2.1.15) у вигляді [224]:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = A \left(U - \frac{dx}{dt} \right)^2 . \quad (2.19)$$

Проінтегрувавши рівняння (2.19), отримаємо

$$x = \frac{1}{A} [UA\tau - \ln(1 + UA\tau)] \quad (2.20)$$

Результати розрахунку величини переміщення частинки забруднювача, що знаходиться біля стінки кавітаційної бульбашки, яка сплескується, в залежності від розмірів частинки і статичного тиску зведені в табл. 2.2 [224].

Таблиця 2.2 – Залежність величини переміщення частинки забруднювача, що знаходиться біля стінки кавітаційної бульбашки, яка сплескується, в залежності від розмірів частинки і статичного тиску

Діаметр частинки, мкм	Статичний тиск, МПа	Переміщення в воді, мкм	Переміщення в бензині, мкм	Переміщення в АМГ-10, мкм
10	0,1	41,279702	74,60884	38,5649
	0,5	39,107835	54,17943	25,67424
	1	22,328168	34,98349	6,970632
	1,5	5,675779	14,38415	6,211486
	2	0,036039	0,641432	0,125832
100	0,1	6,026788	12,21081	5,565946
	0,5	5,657538	8,309672	3,480699
	1	2,969696	4,969105	0,821381
	1,5	0,658521	1,813939	0,725461
	2	0,003648	0,067504	0,012873

Аналіз отриманих розрахункових значень величини переміщення частинки забруднювача в кавітаційній області ультразвукового поля значно перевищує розміри пор фільтрувальної перегородки, які в

фільтрах тонкого очищення сягають 5 ... 20 мкм. Коливальні рухи частинок забруднювача не дозволяють їм проникнути крізь пори фільтра. Цей ефект іноді називають ефектом «п'яної» частинки. Зіштовхуючись між собою, частинки, що коливаються, коагулюють і осідають в шламозбірник фільтра. Проникнути через пори фільтра такі укрупнені частинки не можуть. Зіткнення подібних частинок забруднювача, що інтенсивно коливаються, з фільтрувальною перегородкою, сферичні ударні хвилі від бульбашок, що сплескуються, та високоенергетичні кумулятивні струмені, що виникають при сплескуванні кавітаційних бульбашок біля поверхні фільтрувальної перегородки, призводять, крім кавітаційної ерозії фільтрувальної перегородки, до збудження в ній ультразвукових коливань. Ці коливання істотно знижують поверхневе тертя при протіканні рідини крізь пори фільтрувальної перегородки, що призводить до підвищення продуктивності фільтра при інших рівних умовах. Знаходження фільтрувальної перегородки в кавітаційному середовищі забезпечує їй за рахунок супутніх кавітації ефектів практичну незасмічуваність [228].

2.2.2. Моделювання ударної взаємодії частинки забруднювача з фільтроелементом при ультразвуковому кавітаційному фільтруванні

Для розрахунку силової взаємодії рухомих частинок забруднювача з нерухомою поверхнею фільтроелементу, що деформується, доцільно використовувати методика, в основі якої лежить розв'язок контактної задачі Герца. Такий підхід може бути застосований для обчислення деформацій і напружень матеріалу фільтроелементу з врахуванням енергії удару частинок забруднювача [229].

Насправді під час взаємодії твердої частинки забруднювача з

нерухомою стінкою відбувається удар і напруження, які можуть бути значно більші ніж межа пружності. Вони концентруються на незначній поверхні та діють лише протягом долі секунди. При розрахунку задачі Герца допускають, що при статичному навантаженні в тілах відбуваються лише пружні деформації.

Схему ударної взаємодії частинки забруднювача з поверхнею нерухомої стінки по нормалі до поверхні можна представити згідно з рис. 2.23. Тобто, частинка забруднювача рухається як жорстке тіло з дуже великою швидкістю $v > 1000 \text{ м/с}$, кут між напрямом руху і площиною поверхні φ твердої стінки, що деформується, складає майже 90° . Частинка діє на нерухому поверхню з силою F , яку можна представити у вигляді нормальної сили F_n та сили тертя F_T .

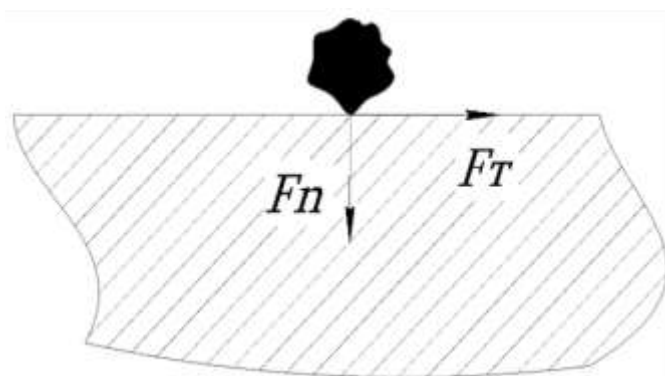


Рис. 2.23 – Силова схема ударної взаємодії частинки забруднювача з поверхнею фільтроелемента

При збільшенні сили удару частинки забруднювача о поверхню фільтроелементу контактні напруження збільшуються і можуть досягати границі міцності. Згідно роботи [230], руйнування твердої стінки відбувається за умови, якщо напруження на контактній поверхні перевищує $K_D \sigma_c$, де σ_c – границя міцності матеріалу твердої стінки;

ζ_d – коефіцієнт динамічності при ударному навантаженні.

Для розрахунку глибини занурення частинок забруднювача в нерухому поверхню фільтроелементу необхідно розв'язати систему рівнянь з теорії механіки суцільного середовища про вдавлювання жорсткої сфери у деформівний напівпростір. Через складність розрахунку ударних хвиль деформації задачу зводимо до розв'язання системи рівнянь для однієї з множини частинок [231].

В якості початкових умов приймалося, що в момент часу $t = t_0$ швидкість руху частинки забруднювача сферичної форми масою m_c радіусом r_c дорівнює V_0 , швидкість переміщення нерухомої поверхні тіла фільтроелементу масою m_f , яке обмежене напівпростором (рис. 2.23), дорівнює нулю. Відомі пружні характеристики матеріалів частинки забруднювача та фільтроелементу - модулі пружності E_1, E_2 та коефіцієнти Пуассона U_1, U_2 . Границя міцності матеріалу поверхні фільтроелементу σ_B менша ніж границя міцності матеріалу частинки забруднювача. Взаємодія відбувається під кутом, близьким до нормалі нерухомої поверхні.

Виходячи з початкових умов, розрахунок змінних параметрів сили удару проводився для моментів часу, які визначалися послідовною зміною часу взаємодії на величину приросту Δt . Усі розрахунки продовжувалися до початку зворотного руху частинки забруднювача t_1 , а згодом до закінчення взаємодії t_2 . Час взаємодії визначався залежністю

$$t = \sum_{i=1}^n \Delta t_i \quad (2.21)$$

Припустимо, що ударна взаємодія частинки забруднювача та

матеріалу нерухокої поверхні фільтроелементу відбувається в момент часу t_0 . Також в цей момент будь-які види напруженого стану в обох тілах відсутні. Через приріст часу Δt , тобто в момент часу $t_1 = t_0 + \Delta t$ в контактуючих тілах утворюються просторово локалізовані зони напружено-деформованого стану обсягами δ_1 та δ_2 , обумовленими сферами з радіусами $r = v_{yb} t_1$. Це дає змогу розрахувати маси деформованого об'єму матеріалу в частинці та в тілі фільтроелементу за формулами:

$$m_D = \rho_T \pi (v_{yb} t)^3, \text{ при } m_D < m_T; \\ m_D = m_T, \text{ при } m_D > m_T, \quad (2.22)$$

ρ_T – щільність матеріалу фільтроелементу, кг/м^3 ; v_{yb} – швидкість поширення ударної хвилі, м/с ; m_D – маса деформованого тіла, кг .

Саме закон збереження енергії став основою побудови математичної моделі. Передбачається, що кінетична енергія руху частинки забруднювача при контакті з нерухокою поверхнею фільтроелементу переходить в енергію пружної деформації його матеріалу, тертя на контактних поверхнях та енергію ударних хвиль, що поширюються по частинці забруднювача та нерухокої поверхні. Тому доцільно буде записати:

$$E_{k1} = E_{y1} + E_{y2} + E_{TP} + E_{II} + E_{B1} + E_{B2} \quad (2.23)$$

де E_{k1} – кінетична енергія частинки забруднювача; E_{y1} , E_{y2} – енергія пружних деформацій частинки забруднювача та нерухокої поверхні; E_{TP} , E_{II} – втрати енергії на тертя, пластичні деформації та інші види незворотних втрат; E_{B1} , E_{B2} – хвильова енергія частинки забруднювача і

поверхні фільтроелементу, яка визначається об'ємами, що охоплені ударною хвилею.

Співвідношення між енергією хвилі деформації та пружною деформацією раніше досліджувалось в роботі [232]. Результати показують, що в кожній окремій хвилі енергія пружних деформацій дорівнює кінетичної енергії хвилі, але при накладенні декількох хвиль стиснення і розтягування цей баланс порушується, оскільки по-різному підсумовується енергія. В той час, коли хвиля відбивається від вільної поверхні тіла, хвиля стиснення додається до відбитої хвилі і нерухома поверхня звільняється від енергії деформацій. Як результат, кінетична енергія частинок подвоюється. Однак, при відбитті хвилі деформації від жорсткої, локально zdeформованої стінки, все відбувається навпаки, тобто енергія деформацій подвоюється за рахунок розвантаження частинок тіла від кінетичної енергії. Такі процеси, а саме, повне розвантаження і подвоєння деформацій, можуть відбуватися тільки для тіл простої форми, наприклад, стрижня. Якщо тіла складної форми, то збільшення енергії пружної деформації за рахунок енергії хвилі відбувається лише частково. Підсумувавши все вище зазначене, слід підкреслити, що величина поверненої хвильової енергії пропорційна енергії пружної деформації.

Для подальших розрахунків цієї моделі будемо враховувати тільки часткове повернення первинної хвилі деформації стиснення і розтягування. Всі інші хвилі, які формуються в тілах в результаті проходження первинних хвиль, враховувати не будемо. Рівняння передачі енергії в цьому випадку можемо записати у вигляді:

$$E_{к1} (1 - k_B \eta) = E_{TP} + E_{П2} \quad (2.24)$$

k_B – коефіцієнт збільшення пружної деформації за рахунок енергії хвилі, який змінюється у межах від 1,5 до 2,0; η – коефіцієнт передачі

кінетичної енергії.

$$\eta = \frac{E_{ynp}}{E_{\kappa 1}}, \quad (2.25)$$

де E_{ynp} – енергія пружної деформації частинки забруднювача та фільтроелементу, Дж.

Щоб визначити поле напружень, ударно взаємодіючих тіл, потрібно записати закон розподілу енергії в процесі удару. Для визначення співвідношення між кількістю енергії, що витрачається на формування пружних (оборотних) деформацій у взаємодіючих тілах, та кількістю енергії, яка необхідна для формування пластичних (необоротних) деформацій, використовувались закони збереження енергії імпульсу. Тому ударну взаємодію можемо описати наступною системою рівнянь:

$$\frac{m_q v^2}{2} = \frac{2}{\eta} \left(\frac{m_q u_1^2}{2} + \frac{m_D u_1^2}{2} \right),$$

$$m_q (\vec{v} - \vec{u}_1) = \vec{F}_{cp} \Delta t, \quad (2.26)$$

$$-m_D \vec{u}_2 = \vec{F}_{cp} \Delta t,$$

де m_D, m_q – маса частинки забруднювача та деформованого тіла, охоплених хвилями деформації в момент часу t , кг; v – швидкість частинки забруднювача до удару, м/с; u_1, u_2 – швидкості ма m_D, m_q після удару, м/с; F_{cp} – середнє зусилля, яке діє в інтервалі часу Δt , Н.

Ця система рівнянь має такі невідомі параметри, як: u_1, u_2, F_{cp} . Для визначення коефіцієнта передачі кінетичної енергії можна скористатися наступним виразом:

$$\eta = \frac{2F_{ycp}\Delta h_y}{m_q v^2} \quad (2.27)$$

F_{ycp} – середнє зусилля пружних деформацій в інтервалі часу Δt , Н;
 Δh_y – приріст пружної деформації за час Δt , м.

Середнє зусилля за час Δt деформації фільтроелементу визначається залежністю:

$$F_{ycp} = \frac{F_y(h_y - \Delta h_y) + F_y(h_y)}{2} \quad (2.28)$$

h_y - пружна деформація, м.

В рамках одного кроку за час Δt визначаються всі параметри, що входять в систему рівнянь (2.26) в наступному порядку.

Визначаються значення сили пружного взаємодії в контактї. Значення F_y розраховується при кожному значенні t_i . Кожен раз уточнюється значення коефіцієнта відновлення. У формулу підставляється значення, отримане на попередньому кроці по часу. В якості початкового значення при розрахунку можна прийняти $\eta_1 = 1$.

Із системи рівнянь (2.26) далі при кожному значенні часу t_i знаходяться швидкості частинки забруднювача та нерухомої поверхні після удару:

$$u_{2i} = \frac{F_{ycp}\Delta t}{m_{Di}};$$

$$u_{1i} = \frac{F_{ycp}\Delta t}{m_{qi}}. \quad (2.29)$$

Для визначення сили за період часу Δt удару сполучених тіл використовувалася теорія контактної взаємодії Герца. При розрахунках поля напружень, що змінюються з плином часу, необхідно

використовувати рівняння, яке встановлює зв'язок між силою F_{ycp} (Δt), що діє на поверхнях контакту двох тіл, які піддаються взаємному стисненню, та загальною деформацією $\Delta h(\Delta t)$.

Розрахунок пружних деформацій в процесі ударної взаємодії тіл крім рівнянь Герца враховує закони передачі кінетичної енергії і імпульсу. При цьому при рішенні система рівнянь ((2.26),(2.28)) врахована умова

$$F_{cp} = F_{ycp}(\Delta h) \quad (2.30)$$

Рішення системи рівнянь відносно невідомих параметрів дозволяє визначити величину приросту пружної деформації Δh_y за період часу Δt . Виходячи з формули Герца, значення пружної деформації обчислювалося за формулою:

$$h_y = 1/1,5 \sqrt{\frac{F_{ycp}}{k_{II}}}, \quad (2.31)$$

де k_{II} – коефіцієнт, що визначається за формулою:

$$k_n = 1,33\sqrt{r} \frac{E_1 E_2}{(1-\nu_1^2)E_2 + (1-\nu_2^2)E_1} \quad (2.32)$$

Загальна пружна деформація за час удару t визначалася підсумовуванням приростів:

$$h_y = \sum_{i=1}^n \Delta h_{yi} \quad (2.33)$$

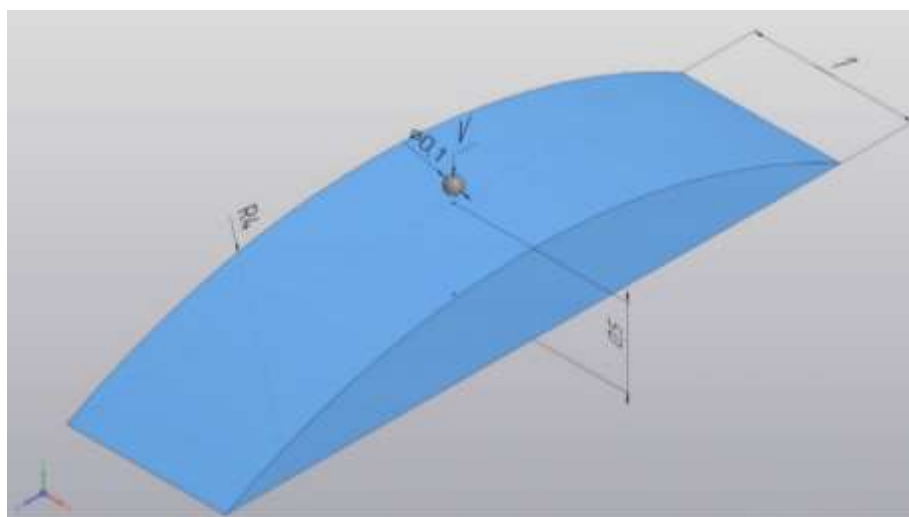
Опираючись на теоретичну модель, проведено математичне моделювання ударної взаємодії частинки бруду з фільтроелементом при ультразвуковому кавітаційному фільтруванні з використанням проєкційно-сіткових методів скінченних елементів та скінченних різниць, які реалізовані в програмному забезпеченні ANSYS® Academic

У якості матеріалу для виготовлення фільтроелементу обрано зразки зі сталі 12Х18Н10Т та фторопласту Ф4 з ізотропними фізико-механічними характеристиками, які отримані з літературних джерел [234–236]. Границя статичної міцності матеріалу заготовки зі сталі 12Х18Н10Т дорівнює 490 МПа, а для фторопласта Ф4 – 32 МПа. Для моделі забруднювача використовувались частинки іржі (Fe_2O_3) сферичної форми діаметром 10 мкм та 100 мкм. Початкова швидкість жорстких частинок забруднювача вибрана як мінімальна швидкість, величини якої отримані в роботі [237] при моделюванні даних процесів. Для розглянутих в дослідженні чотирьох розрахункових схем з різними типами матеріалів фільтроелемента швидкість двох видів частинок іржі дорівнювала 2000 м/с.

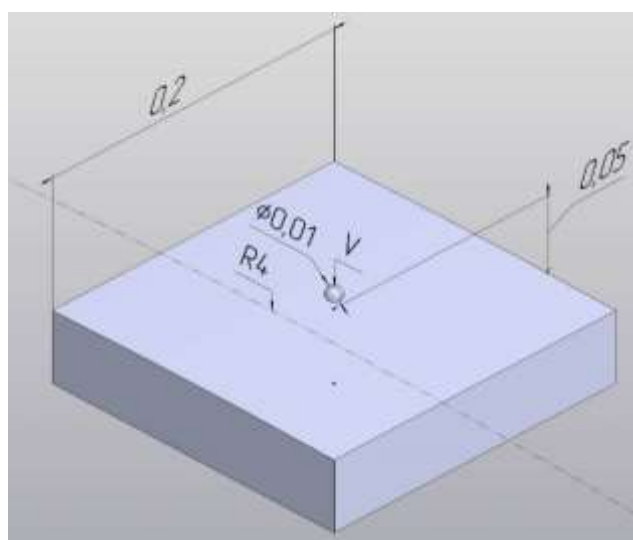
Дискретизація об'ємів контактуючих тіл для проведення обчислень деформацій та напружень фільтроелемента виконувалась тетраїдальними скінченними елементами в кількості 431 089 для моделей з частинками забруднювача 100 мкм (рис. 2.24б) та відповідно – 396 863 для моделей з частинками забруднювача 10 мкм (рис. 2.24б).

Перший варіант моделювання проведено для ударної взаємодії забруднювача діаметром 10 мкм з фільтроелементом зі сталі 12Х18Н10Т при ультразвуковому кавітаційному фільтруванні.

В результаті чисельних розрахунків отримано величини максимальної деформації поверхні фільтроелемента, яка дорівнює $4.3956 \cdot 10^{-6}$ м (рис. 2.25а) та максимального еквівалентного за Мізесом напруження – 1309 МПа.



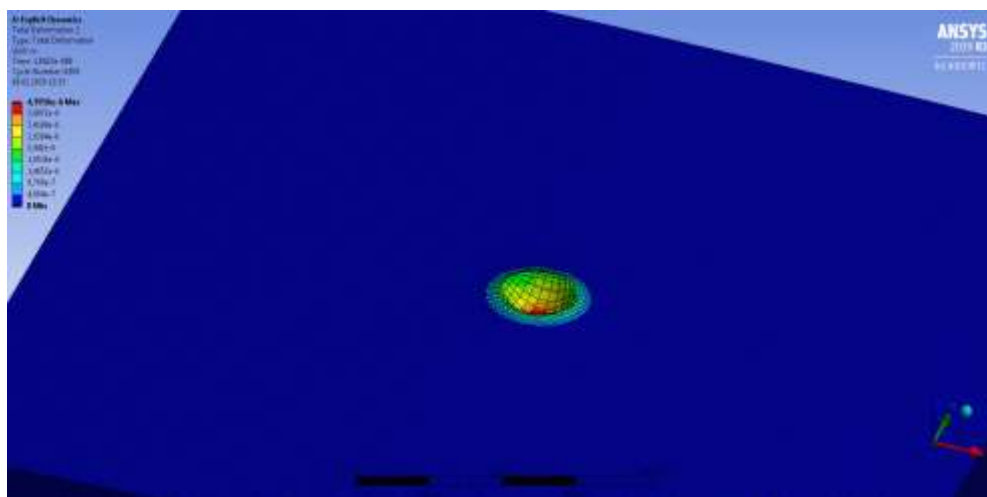
a)



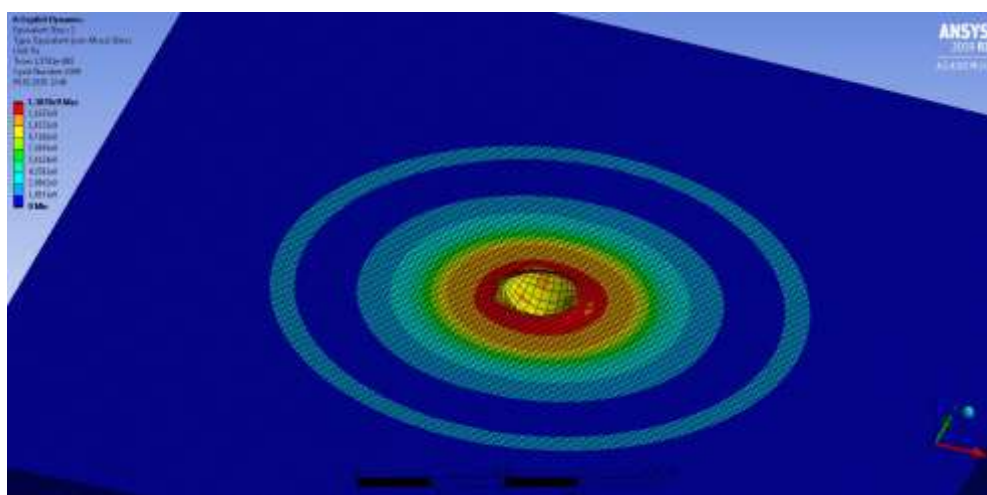
б)

Рис. 2.24 – Імітаційні моделі для дослідження ударної взаємодії частинки забруднювача з поверхнею фільтроелементу (а - для забруднювача діаметром 100 мкм; б - для забруднювача діаметром 10 мкм.)

Зона ймовірного руйнування даного матеріалу складає 5,6 діаметрів частинки забруднювача (рис. 2.25б).



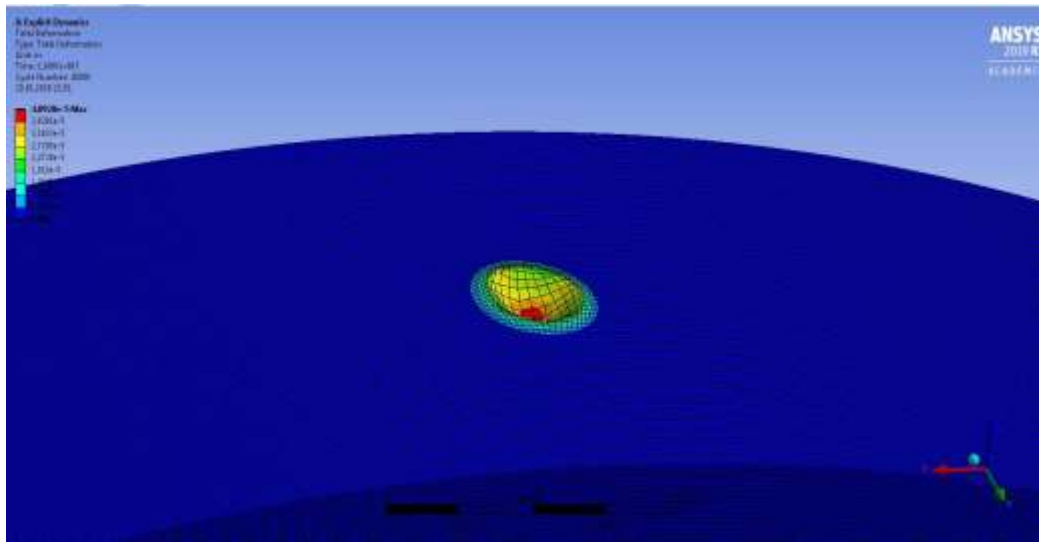
а)



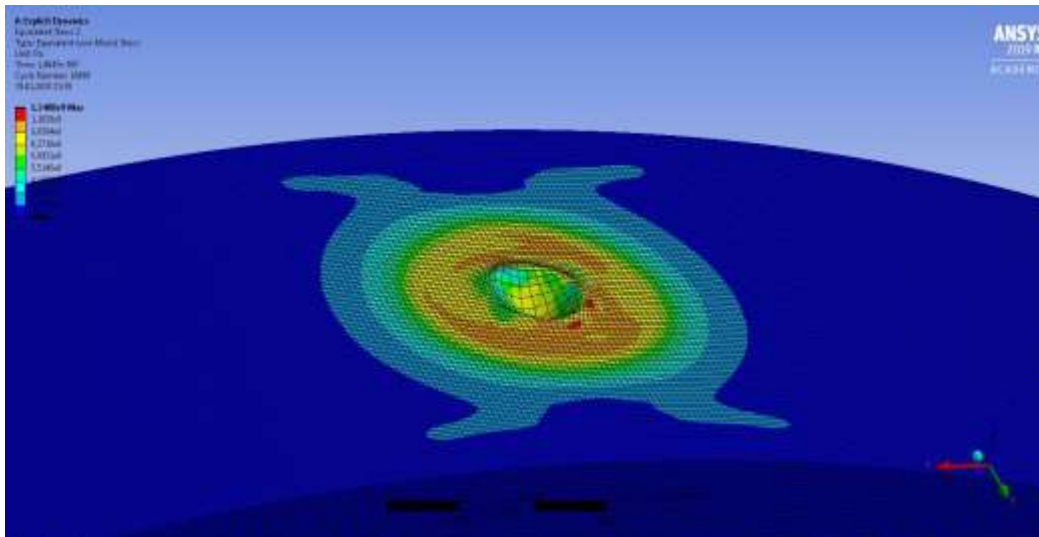
б)

Рис. 2.25 – Результати моделювання (а – повна деформація; б – еквівалентне за Мізесом напруження, що виникає в зоні контакту)

Наступним проводилося моделювання взаємодії частинки забруднювача діаметром 100 мкм з фільтроелементом зі сталі 12Х18Н10Т. У цьому випадку максимальна повна деформація дорівнює 4.0928×10^{-5} м (рис. 2.26а), а максимальне еквівалентне за Мізесом напруження досягає 1241 МПа. Зона ймовірного руйнування 5,2 діаметрів частинки забруднювача (рис. 2.26б).



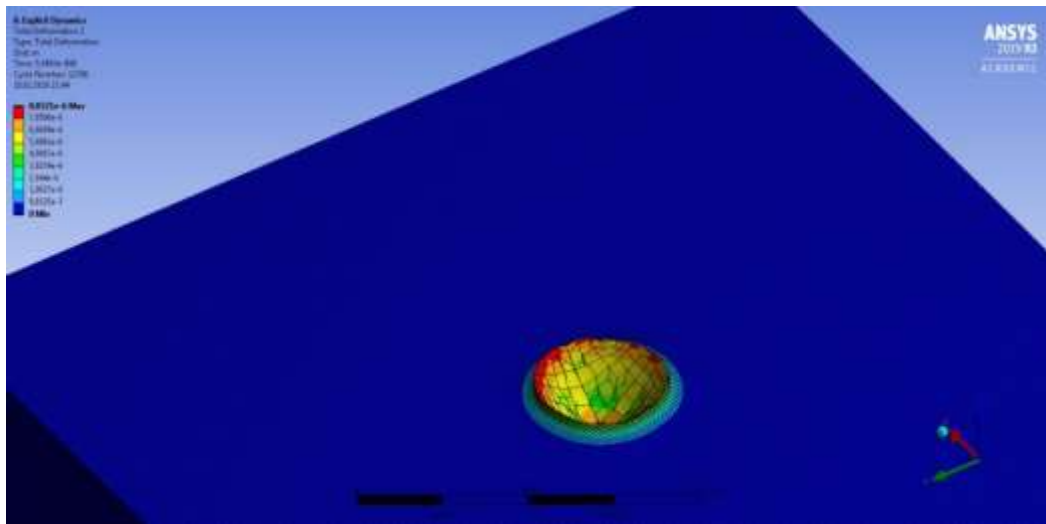
a)



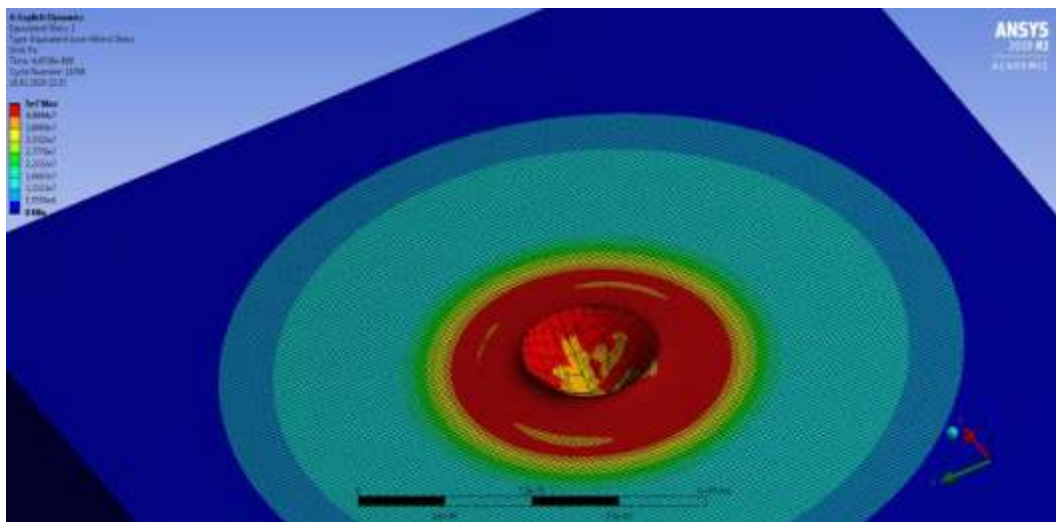
б)

Рис. 2.26 – Результати моделювання (а – повна деформація; б – еквівалентне за Мізесом напруження, що виникає в зоні контакту)

Після цього проводилось моделювання взаємодії фторопласту Ф4 з частинкою забруднювача діаметром 10 мкм. Як результат, отримано величини максимальної деформації – 4.3956×10^{-6} м (рис. 2.27а) та максимального за Мізесом еквівалентне напруження – 1308 МПа. Зона ймовірного руйнування становить 6,5 діаметрів частинки забруднювача (рис. 2.27б).



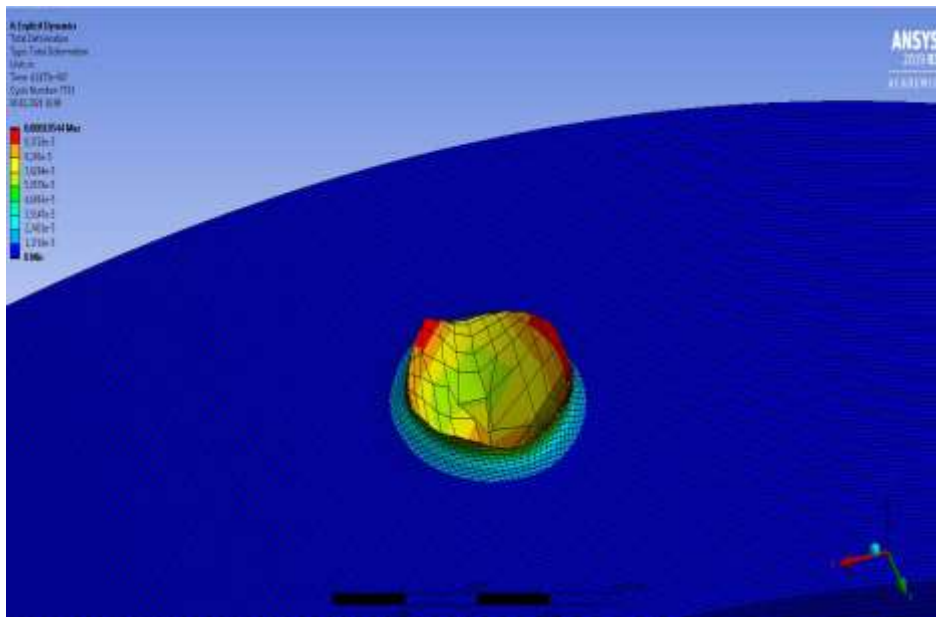
a)



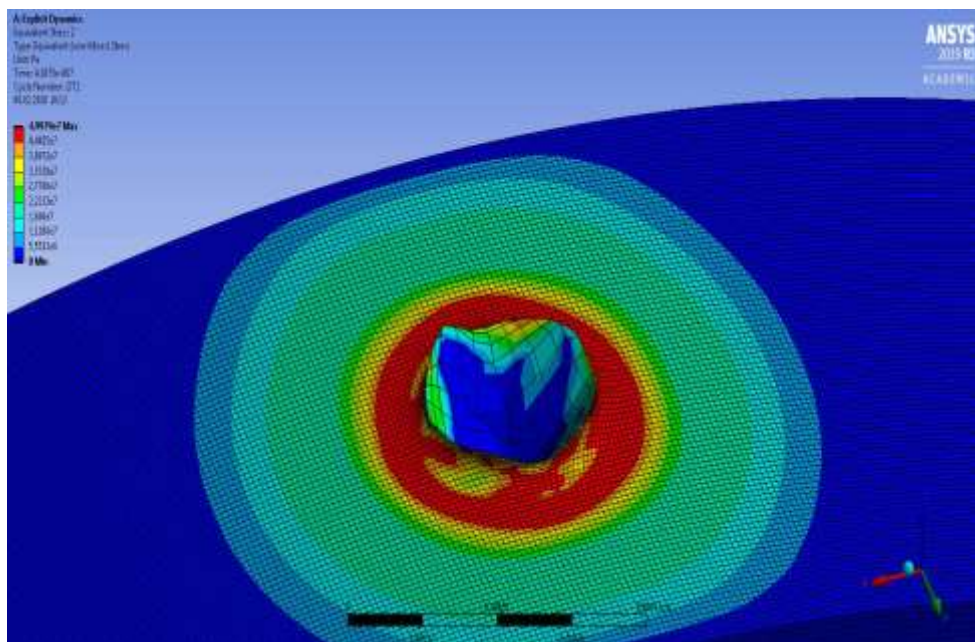
б)

Рис. 2.27 – Результати моделювання (а – повна деформація; б – еквівалентне за Мізесом напруження, що виникає в зоні контакту)

Для порівняння виконали моделювання взаємодії частинки забруднювача діаметром 100 мкм з фторопласту Ф4. В такому варіанті отримали максимальну повну деформацію 1.0544×10^{-5} м (рис. 2.28а) та максимальне еквівалентне за Мізесом напруження, яке досягає 50 МПа. Зона ймовірного руйнування складає 6,2 діаметрів частинки забруднювача (рис. 2.28б).



a)



б)

Рис. 2.28 – Результати моделювання (а – повна деформація; б – еквівалентне за Мізесом напруження, що виникає в зоні контакту)

Аналіз отриманих результатів моделювання показує, що

напруження, які виникають під час зіткнення частинки невеликих розмірів при надзвукових швидкостях з нерухомою поверхнею, перевищують межі міцності досліджених конструкційних матеріалів. Зіткнення таких частинок з фільтрувальною перегородкою викликає ерозійне руйнування матеріалу фільтроелементу, що потребує ретельного підбору конструкційних матеріалів для виготовлення фільтрів, які працюють в ультразвуковому кавітаційному середовищі.

У результаті моделювання встановлено, що сталь 12Х18Н10Т в два рази більш стійка до ерозійного руйнування, ніж фторопласт Ф4. Для підбору кавітаційно стійкого матеріалу для виготовлення фільтроелементів потрібно збільшити кількість досліджуваних модельних матеріалів та підтвердити результати моделювання натурним експериментом.

2.3. Розробка технічного рішення ультразвукового кавітаційного фільтра з ефектом самоочищення

Аналіз відомих з літературних джерел технічних рішень ультразвукових випромінювачів дозволив запропонувати перспективну схему УЗФ (рис. 2.29, рис. 2.30, рис. 2.31) [204].

Запропонована конструкція складається з резонансної трубчастої кавітаційної камери, виконаної у вигляді суцільної труби 1 (рис. 2.29), акустично розв'язаної з місцями кріплення та під'єднання. Акустичне розв'язування реалізовано за рахунок кріплення суцільної труби 1 в вузлових точках поздовжньо-згинальної хвилі деформації 2, що встановлюється по довжині труби. В нижній частині труба 1 з'єднана з конусоподібним шламозбірником 3, який має патрубок 4 для відведення шламу.

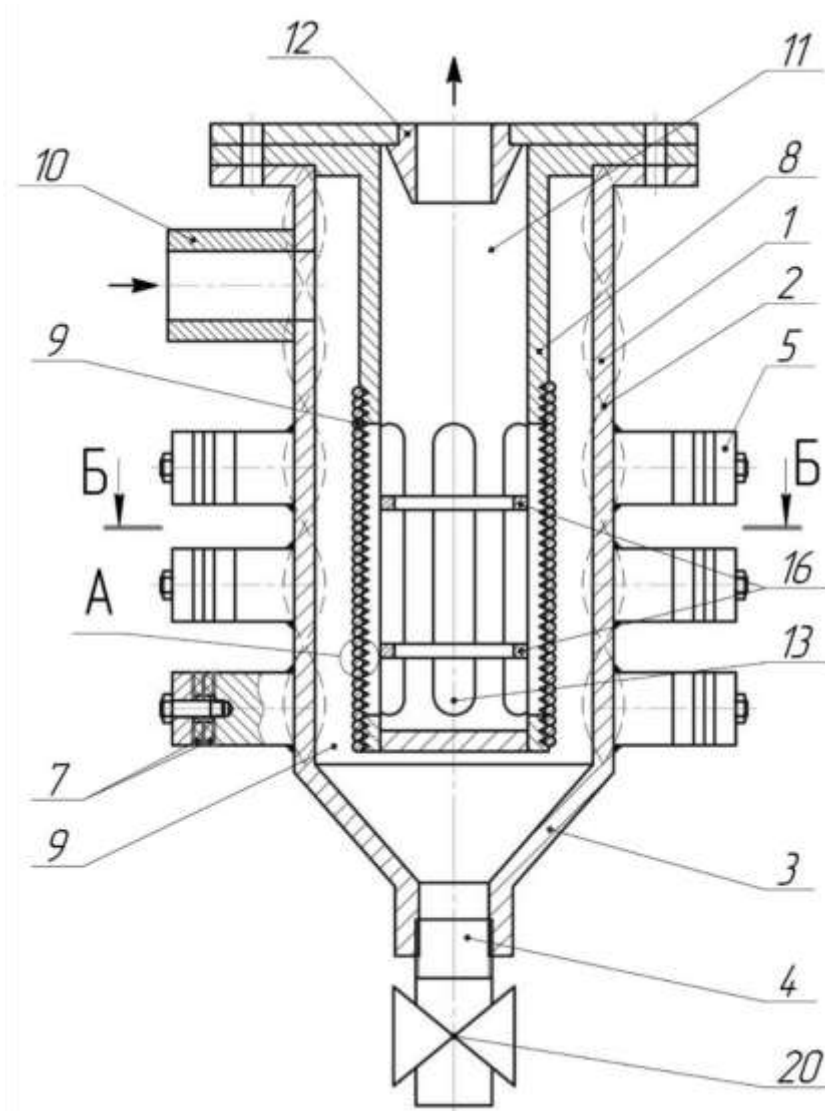


Рис. 2.29 – Схема УЗФ з резонансним корпусом

На зовнішній твірній поверхні труби 1 вздовж твірної лінії посекційно встановлені складені ультразвукові перетворювачі 5 з ножевидними трансформаторами коливальної швидкості 6 (рис. 2.30) та п'єзокерамічними кільцями 7, які електрично підключені до генератора електричних коливань системи автоматичного керування (на схемі умовно не показана) таким чином, що в трубі збуджуються резонансні радіальні або радіально-згинальні та поздовжньо-згинальні коливання, а місце розміщення ультразвукових перетворювачів 5 в межах секцій та відстань між секціями здовж труби регламентовані параметрами

резонансних коливань труби 1, тобто вони розміщені в пучностях поздовжньо-згинальної хвилі деформації 2, що встановлюється по довжині труби 1.

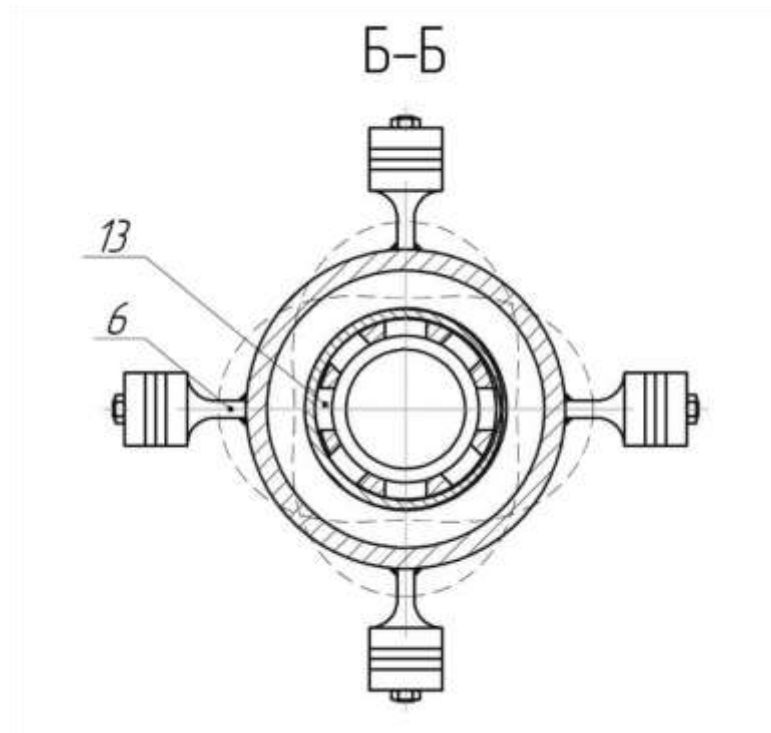


Рис. 2.30 – Перетин по лінії Б-Б

Усередині кавітаційної камери вздовж осі розміщений трубчастий циліндричний фільтрувальний елемент 8, що ділить кавітаційну камеру на частину 9 з засміченою рідиною, що має патрубок 10 для підведення рідини, та частину 11 з очищеною рідиною, яка має патрубок 12 для відведення рідини, причому камера 11 з очищеною рідиною утворена всередині фільтрувального елемента. Трубчастий циліндричний фільтрувальний елемент 8, як варіант, може бути виконано у вигляді труби з наскрізними поздовжніми вікнами 13 (рис. 2.29, рис. 2.30), на зовнішній поверхні якої в області поздовжніх вікон 13 виконана різьбова канавка 14 (рис. 2.31), в яку укладена та закріплена проволока 15 (рис. 2.31) з кавітаційно стійкого матеріалу з утворенням фільтрувального

зазору між витками проволочки [204].

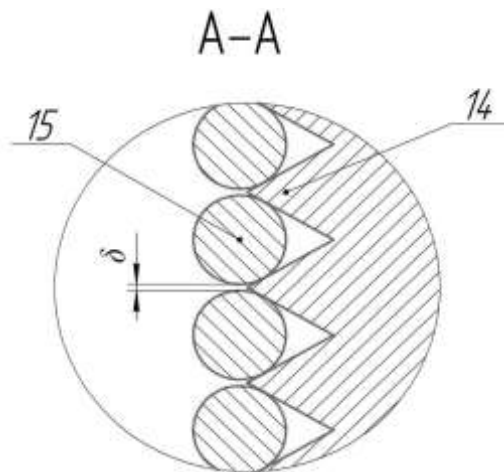


Рис. 2.31 – Збільшений фрагмент А-А зі схеми УЗФ

Необхідна жорсткість конструкції трубчастого фільтрувального елемента 8 з наскрізними поздовжніми вікнами 13 забезпечена розпірними кільцями 16, що встановлені всередині труби фільтроелемента в зоні поздовжніх вікон 13. Труба 1 кавітаційної камери може бути виконана у вигляді окремих, акустично розв'язаних та ущільнених ущільненнями кілець, на кожному з яких розміщені окремі секції ультразвукових перетворювачів, а товщина кілець вибрана меншою за половину довжини хвилі поздовжньо-згинальних коливань. При цьому кільця стягнуті між собою поздовжніми шпильками. На патрубку 4 для відведення фільтрату з конусоподібного шламозбірника 3 встановлений клапан 20 автоматичного видалення шламу, під'єднаний до системи автоматичного керування [70].

УЗФ, що пропонується [204], працює наступним чином. Через фільтр за допомогою вхідного 10 та вихідного 12 патрубків прокачується під тиском рідина, яка потребує очищення. При подачі високочастотної напруги від електричного генератора коливань системи автоматичного керування на ультразвукові перетворювачі 5 в останніх збуджуються

поздовжні резонансні пружні механічні коливання, які передаються циліндричній трубі 1 або окремим циліндричним кільцям. Ультразвукові трансформатори коливальної швидкості 6 забезпечують збільшення амплітуди коливань до необхідного рівня. Ножевидна форма трансформаторів коливальної швидкості та їх розташування вздовж твірної лінії труби забезпечує мінімальний вплив кріплення трансформаторів на форму коливань труби 1 або окремих кілець. Обрані геометричні розміри труби 1 або окремих кілець забезпечують їх збудження на резонансній частоті радіальних або радіально-згинальних та поздовжньо-згинальних коливань. Резонансні коливання кавітаційної камери призводять до виникнення в рідині ефекту кавітації. При сплескуванні кавітаційних бульбашок утворюються руйнівні ударні хвилі, енергоємні кумулятивні струмені [216], високий тиск (до 103 МПа) та температура (до 1000⁰С) в мікрооб'ємах рідини, що забезпечує постійне очищення фільтрувального елемента, загибель мікроорганізмів, тобто знезараження рідини та отримання стійких емульсій. Коливання частинок забруднювача в ультразвукових хвилях призводить до їх злипання та осаджування в шламосбірник. Через певний час по команді системи автоматичного керування за допомогою клапана 20 відбувається видалення шламу із шламосбірника [204].

2.4. Методика розрахунку циліндричної ультразвукової кавітаційної камери фільтра з ефектом самоочищення

Кавітаційна камера фільтра являє собою доволі складну резонансну систему, яка дозволяє створити всередині її ємності розвинене кавітаційне середовище. Для ефективної роботи камери необхідно узгодити резонансні коливання, синхронно працюючих, п'єзоелектричних приводів-випромінювачів поздовжніх коливань, що

встановлюються ззовні здовж твірної лінії циліндричної поверхні камери, з поздовжніми резонансними коливаннями по довжині циліндричної камери та резонансними радіально – згинальними коливаннями по діаметру камери (рис. 2.32).

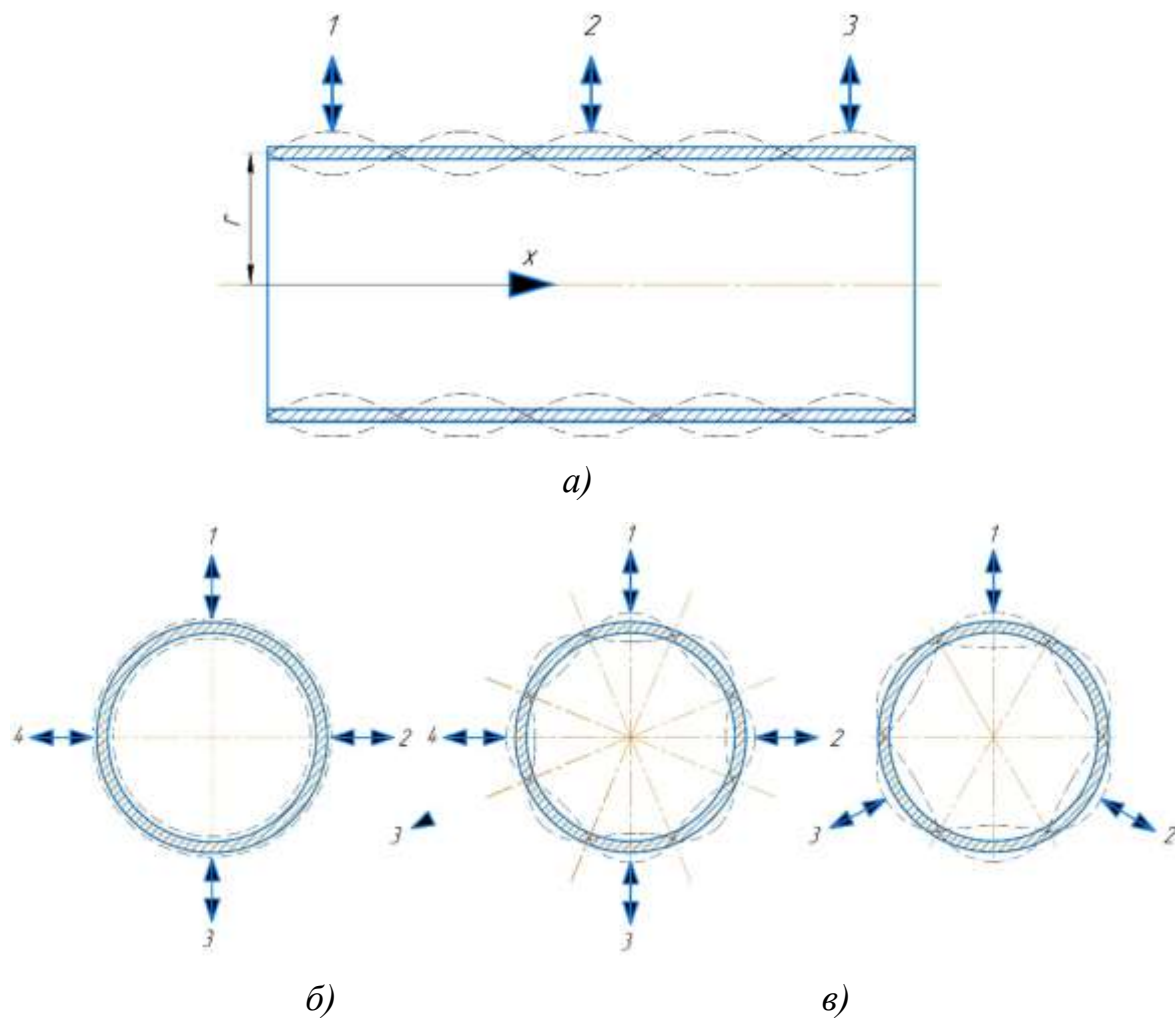


Рис. 2.32 – Розрахункова акустична схема кавітаційної камери фільтру

*(а – схема збудження згинальних коливань по довжині корпусу;
 б – схема збудження циліндричного корпусу на радіальній моді коливань; в – схеми збудження радіально – згинальних коливань з парною та непарною кількістю n 'єзоелектричних приводів – випромінювачів, що збуджуються синхронно)*

В разі збудження радіальної моди коливань за рахунок внутрішньої циліндричної поверхні камери відбувається фокусування ультразвукових коливань вздовж осі камери. Це призводить до суттєвого підвищення інтенсивності ультразвукових коливань вздовж осі камери (рис. 2.33) [89].

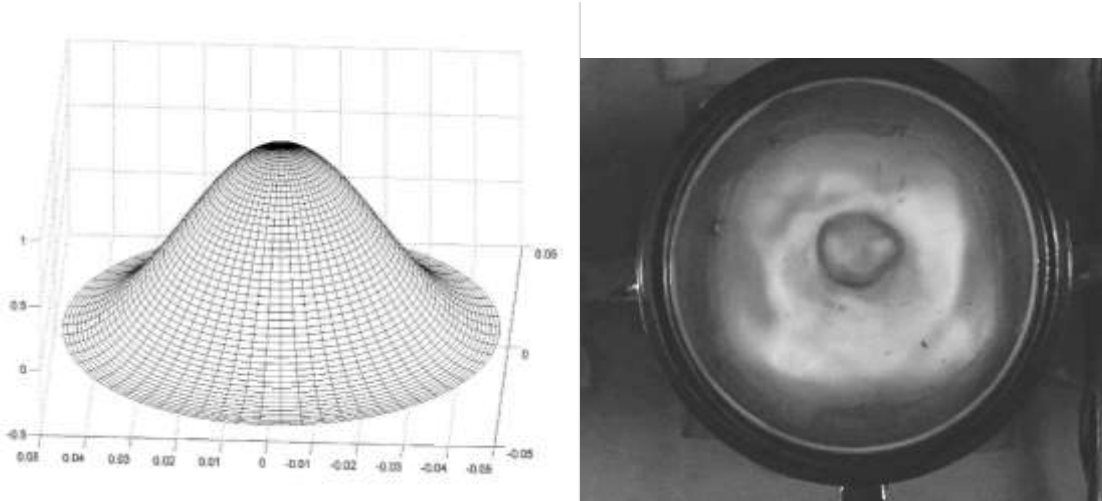


Рис. 2.33 – Форма ультразвукового поля в циліндричній камері у випадку збудження радіальної моди коливань поверхні

Таке ультразвукове поле з інтенсивністю більше 100 Вт/см^2 здатне ефективно інактивувати шкідливі для здоров'я людини мікроорганізми, але на внутрішній поверхні камери інтенсивність буде незначною, недостатньою для збудження ультразвукової кавітації поблизу внутрішньої поверхні.

У разі збудження радіально-згинальних коливань циліндричної поверхні камери в об'ємі камери утворюється ультразвукове поле середньої інтенсивності з великою кількістю вузлів та пучностей. Якщо ця інтенсивність буде перевищувати поріг виникнення кавітації за цих умов, то кавітаційна область розповсюдиться по всьому об'єму камери (рис. 2.34) [89].

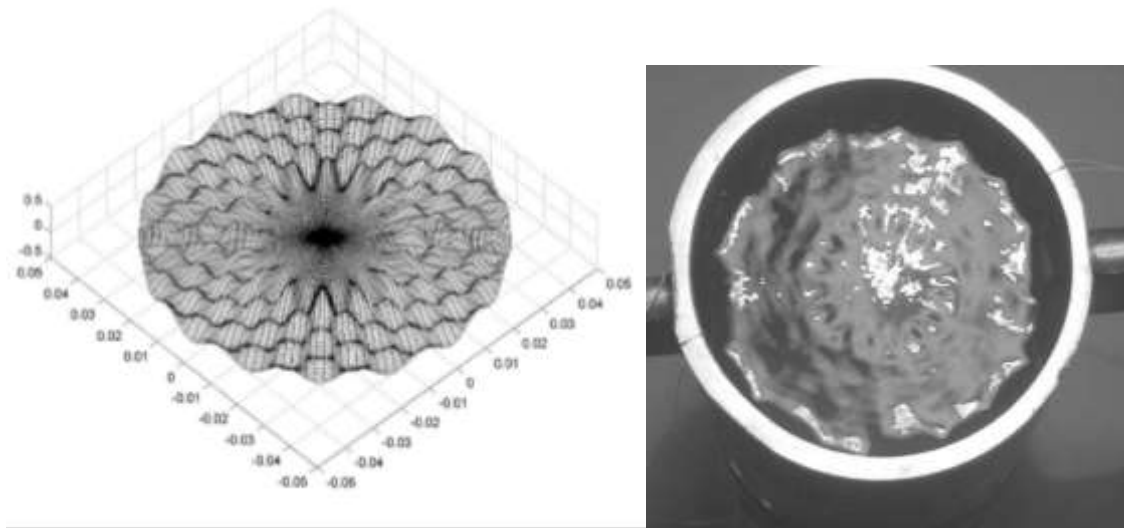


Рис. 2.34 – Форма ультразвукового поля в циліндричній камері у випадку збудження радіально-згинальних коливань поверхні

Для побудови ультразвукового фільтра з ефектом самоочищення необхідно всередині циліндричної резонансної камери розмістити циліндричний фільтрувальний елемент, а кавітаційну область організувати між внутрішньою поверхнею камери та зовнішньою поверхнею фільтрувального елемента. Тому, мабуть, доречним буде збудження поверхні кавітаційної камери на моді радіально-згинальних коливань.

Поздовжній розмір циліндричної кавітаційної камери згідно розрахункової схеми (рис. 2.32) повинен вміщувати парну кількість чвертей довжини хвилі деформації, що встановлюється по довжині камери. Причому на торцях циліндричної камери, де будуть розміщені торцеві кришки, повинні бути вузли хвилі деформації, що встановилася.

Для розрахунку довжини поздовжньої пружної хвилі деформації, тобто відстані між окремими групами п'єзоелектричних приводів-випромінювачів, що збуджуються синхронно, скористаємося циліндричною системою координат. Будемо вважати, що вісь X

збігається з віссю циліндричної камери, а середній радіус циліндричної камери дорівнює r_0 .

Коливання циліндричної поверхні камери можна представити за допомогою вектору деформації \bar{U} як

$$\bar{U} = \bar{U}_l + \bar{U}_\tau \quad (2.34)$$

де \bar{U}_l – потенціальна складова, \bar{U}_τ – соленоїдальна складова.

Згідно з [238] довільне векторне поле можна представити у вигляді суми градієнта деякого скалярного поля Φ та ротора векторного потенціалу \bar{A} :

$$\bar{U} = \text{grad}\Phi + \text{rot}\bar{A} \quad (2.35)$$

Будемо вважати, що в нашому випадку відсутні крутильні коливання. Тоді можна прийняти, що $\text{rot}\bar{A} = 0$.

Рівняння Геймгольца [239] для потенціалу запишемо у вигляді:

$$c_T^2 \nabla^2 \Phi = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} \quad (2.36)$$

де $c_T^2 = \frac{2\mu_l + \lambda_l}{\rho_k}$ – швидкість звуку в матеріалі циліндричної камери, λ_l

та μ_l – перший та другий коефіцієнти Ламме, ρ_k – щільність матеріалу камери.

Використовуючи метод Фур'є, розв'язок рівняння (2.36) будемо шукати у вигляді

$$\Phi = f(r) \cos n\theta \cdot e^{-j\gamma_T z} \cdot e^{j\omega t} \quad (2.37)$$

де $f(r)$ – функція, що залежить від r , θ – полярний кут, n – ціле число;

γ_T – деяка стала величина.

Після підстановки виразу (2.37) у рівняння (2.36) для функції $f(r)$

отримаємо:

$$f'' + \frac{1}{r} f' + \left(\alpha^2 - \frac{n^2}{r^2} \right) f = 0 \quad (2.38)$$

де $\alpha^2 + \gamma_T^2 = \frac{\omega^2}{c_T^2}$ ω – колова частота α – деяка стала величина.

Зробимо підстановку $x = \alpha r$. Це дасть можливість рівняння (2.38) привести до вигляду:

$$f(x)'' + \frac{1}{x} f(x)' + \left(1 - \frac{n^2}{x^2} \right) f(x) = 0 \quad (2.39)$$

Розв'язок отриманого рівняння Бесселя запишемо у вигляді суми циліндричних функцій Бесселя та Неймана [104, 240]:

$$f(r) = AJ_n(\alpha r) + BN_n(\alpha r) \quad (2.40)$$

де A та B – константи, що залежать від граничних умов, $J_n(\alpha r)$ – функція Бесселя порядку n , $N_n(\alpha r)$ – функція Неймана порядку n .

Знайдемо компоненти вектора \bar{u} :

$$\begin{aligned} U_r &= f' \cos n\theta \cdot e^{-j\gamma_T z} \cdot e^{j\omega t} \\ U_\theta &= -\frac{n}{r} f \sin n\theta \cdot e^{-j\gamma_T z} \cdot e^{j\omega t} \\ U_x &= -\gamma_T f \cos n\theta \cdot e^{-j\gamma_T z} \cdot e^{j\omega t} \end{aligned} \quad (2.41)$$

На вільній поверхні циліндричної камери нормальні складові тензора механічного напруження дорівнюють нулю, тобто:

$$\sigma_{rr} = 0 \Big|_{r=R_1; r=R_2} \quad (2.42)$$

В циліндричній системі координат закон Гука можна виразити рівнянням [239]:

$$\sigma_{rr} = \lambda_n \left(\frac{\partial U_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial U_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial U_x}{\partial z} \right) + 2\mu_n \frac{\partial U_x}{\partial r} \quad (2.43)$$

Враховуючи вираз (2.41) після перетворень отримаємо:

$$\sigma_{rr} = \left[-\lambda_n (\alpha^2 + \gamma_T^2) f + 2\mu_n f'' \right] \cos n\theta \cdot e^{-j\gamma_T z} \cdot e^{j\omega t} \quad (2.44)$$

Після виконання відповідних підстановок отримаємо:

$$\begin{cases} -\lambda_n (\alpha^2 + \gamma_T^2) [AJ_n(\alpha R_1) + BN_n(\alpha R_1)] + 2\mu_n [AJ_n''(\alpha R_1) + BN_n''(\alpha R_1)] = 0 \\ -\lambda_n (\alpha^2 + \gamma_T^2) [AJ_n(\alpha R_2) + BN_n(\alpha R_2)] + 2\mu_n [AJ_n''(\alpha R_2) + BN_n''(\alpha R_2)] = 0 \end{cases} \quad (2.45)$$

Система рівнянь (2.45) буде мати ненульовий розв'язок відносно f у випадку, коли детермінант D даної системи дорівнює нулю, тобто коли справедливим є запис:

$$D = \begin{vmatrix} 2\mu_n J_n''(\alpha R_2) - \frac{\lambda_n \omega^2}{c_l^2} J_n(\alpha R_2) & 2\mu_n N_n''(\alpha R_1) - \frac{\lambda_n \omega^2}{c_l^2} N_n(\alpha R_1) \\ 2\mu_n J_n''(\alpha R_1) - \frac{\lambda_n \omega^2}{c_l^2} J_n(\alpha R_1) & 2\mu_n N_n''(\alpha R_2) - \frac{\lambda_n \omega^2}{c_l^2} N_n(\alpha R_2) \end{vmatrix} = 0 \quad (2.46)$$

Рівняння (2.46) зручно розв'язати графічним методом відносно ω та γ_T . Це дозволяє отримати:

$$\gamma_T = \sqrt{\frac{\omega^2}{c_T^2} - \alpha^2} \quad (2.47)$$

Тоді відстань між ультразвуковими приводами-випромінювачами на зовнішній поверхні циліндричної кавітаційної камери вздовж осі X може бути знайдена як

$$l_x = \frac{2\pi}{\gamma_T} \quad (2.48)$$

Для випадку радіально - згинальних коливань циліндричної поверхні кавітаційної камери резонансна частота визначається залежністю [241, 242]

$$f_{рез} = \frac{1}{2r^2\pi} c_T \frac{h_k}{\sqrt{12}} K_\lambda \quad (2.49)$$

h_k – товщина стінки камери, $K_\lambda = \sqrt{\frac{i^2(1-i^2)^2}{1+i^2}}$ (табл. 2.3) i – число хвиль, розміщених навколо кільця.

Таблиця 2.3 – Значення коефіцієнта від числа хвиль, розміщених навколо кільця

i	2	3	4	5	6	7	8
K_λ	2,683	7,589	14,553	23,534	34,522	47,518	62,516

У випадку збудження радіальної моди коливань трубчастої циліндричної кавітаційної камери резонансна частота може бути розрахована за формулою [241, 242]

$$f_{рез} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{E}{\rho_k r^2}} \quad (2.50)$$

де E – модуль пружності матеріалу труби кавітаційної камери при розтягуванні.

Узгодження резонансних частот радіальних або радіально-згинальних коливань з коливаннями по довжині камери досягається зміною геометричних розмірів циліндричної трубчастої заготовки.

Для збудження резонансних коливань циліндричної кавітаційної камери можуть бути застосовані п'єзоелектричні приводи-випромінювачі поздовжніх переміщень, побудовані у відповідності до 1, 1/2 або 3/4 хвильових акустичних схем. Доцільно застосовувати в даному випадку ультразвукові приводи-випромінювачі з напівхвильовою акустичною схемою, які забезпечують суттєве зменшення масо-габаритних характеристик фільтра з ефектом самоочищення. При цьому,

для зменшення негативного впливу привода-випромінювача поздовжніх коливань на форму власних коливань кавітаційної камери ступінь малого діаметра трансформатора коливальної швидкості привода виконують ножевидною з розміщенням торцевої робочої поверхні на зовнішній поверхні камери вздовж твірної лінії.

Розрахунок акустичних розмірів ультразвукового п'єзоелектричного привода-випромінювача може бути здійснений з урахуванням відомої методики [89, 102, 243, 244].

Напівхвильовий складений п'єзоелектричний привід-випромінювач згідно з розрахунковою схемою (рис. 2.35) [89, 102] будується за принципом ультразвукового перетворювача Ланжевена, в якому одна з накладок, що понижують частоту (демпфуючі накладки), виконана у вигляді трансформатора коливальної швидкості, застосування якого дозволяє отримати необхідну величину амплітуди коливань вихідного торця випромінювача.

Зазвичай, в якості трансформатора коливальної швидкості застосовують ступінчасті, конічні, експоненціальні, катеноїдальні та інші акустичні концентратори, які за рахунок різниці площ вхідного та вихідного торців забезпечують збільшення амплітуди поздовжніх коливань.

В загальному вигляді рівняння поздовжніх коливань складеного ультразвукового привода-випромінювача можна записати як:

$$S \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial}{\partial x} \left(S \frac{\partial \xi}{\partial x} \right) \quad (2.51)$$

де ξ - поздовжнє переміщення; c - швидкість звуку; S - площа поперечного перерізу; ρ - напрямок розповсюдження хвиль.

У разі застосування в приводі-випромінювачі ступінчастого трансформатора коливальної швидкості коефіцієнт трансформації буде

СТАНОВИТИ:

$$K = \frac{S_{\delta}}{S_M} \quad (2.52)$$

S_{δ} – площа вхідного торця, S_M – площа вихідного торця (торця меншої площі).

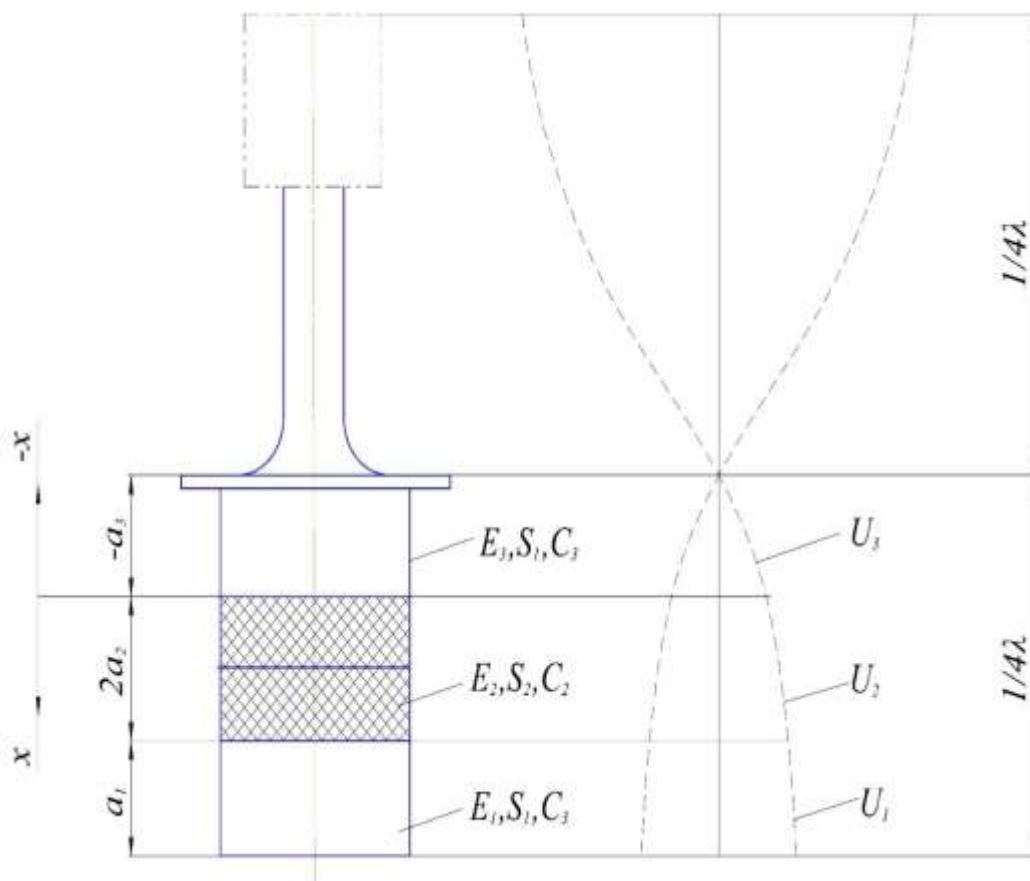


Рис. 2.35 – Розрахункова схема напівхвильового привода-випромінювача

Для акустичної системи, що розглядається, в разі збудження гармонійних коливань рішення загального рівняння (2.51) можна записати як:

$$\xi_1(x, t) = \left(A \cos \frac{\omega}{c_1} x + B \sin \frac{\omega}{c_1} x \right) \sin(\omega t + \phi)$$

$$\xi_2(x,t) = \left(C \cos \frac{\omega}{c_2} x + D \sin \frac{\omega}{c_2} x \right) \sin(\omega t + \phi) \quad (2.53)$$

$$\xi_3(x,t) = \left(Q \cos \frac{\omega}{c_3} x + G \sin \frac{\omega}{c_3} x \right) \sin(\omega t + \phi)$$

Згідно з розрахунковою схемою (рис. 2.35) граничні умови можна записати у вигляді:

$$\xi_3 = 0 \quad \text{прж} = -a_3 \quad ;$$

$$\left. \begin{array}{l} \xi_2 = \xi_3 \\ E_2 S_2 \frac{\partial \xi_2}{\partial x} = E_3 S_1 \frac{\partial \xi_3}{\partial x} \end{array} \right\} \quad \text{прж} = 0 \quad ;$$

$$\left. \begin{array}{l} \xi_2 = \xi_1 \\ E_2 S_2 \frac{\partial \xi_2}{\partial x} = E_1 S_1 \frac{\partial \xi_1}{\partial x} \end{array} \right\} \quad \text{прж} = 2a_2 \quad ; \quad (2.54)$$

$$\frac{\partial \xi_1}{\partial x} = 0 \quad \text{прж} = a_1 + 2a_2 \quad .$$

Приймаючи до уваги умову (2.54), можна з рівняння (2.53) отримати:

$$Q \cos \frac{\omega}{c_3} a_3 = G \sin \frac{\omega}{c_3} a_1 \quad \text{або } Q = G \operatorname{tg} \frac{\omega}{c_3} a_3 \quad (2.55)$$

Тоді рівняння (2.53) прийме вигляд:

$$\xi_3(x,t) = G \left(\sin \frac{\omega}{c_3} x + \operatorname{tg} \frac{\omega}{c_3} a_3 \cos \frac{\omega}{c_3} x \right) \sin(\omega t + \phi) \quad (2.56)$$

Перша половина граничних умов (2.54) дозволяє з урахуванням рівнянь (2.53) та (2.56) записати:

$$C = G \operatorname{tg} \frac{\omega}{c_3} a_3 \quad (2.57)$$

Друга половина умов (2.54) після диференціювання рівнянь (2.53) та

(2.56) дозволяє записати:

$$E_2 S_2 \frac{D}{c_2} = E_3 S_1 \frac{G}{c_3} \quad \text{або} \quad \frac{D}{G} = \frac{E_3 S_1 c_2}{E_2 S_2 c_3} . \quad (2.58)$$

Тоді, спільне рішення рівнянь (2.57) та (2.58) дозволяє отримати:

$$\frac{D}{C} = \frac{E_3}{E_2} \frac{S_1 c_2}{S_2 c_3 \operatorname{tg} \frac{\omega}{c_3} a_3} \quad (2.59)$$

Гранична умова (2.54) дозволяє привести рівняння (2.53) до вигляду:

$$B = A \operatorname{tg} \frac{\omega}{c_1} (a_1 + 2a_2) \quad (2.60)$$

З урахуванням (2.60) рівняння (2.53) перепишемо у вигляді:

$$\xi_1(x, t) = A \left[\cos \frac{\omega}{c_1} x + \operatorname{tg} \frac{\omega}{c_1} (a_1 + 2a_2) \sin \frac{\omega}{c_1} x \right] \sin(\omega t + \varphi) \quad (2.61)$$

Приймаючи до уваги першу половину умов (2.54), рівняння (2.53) та (2.61) можна записати у вигляді:

$$C \left(\cos \frac{\omega}{c_2} 2a_2 + \frac{D}{C} \sin \frac{\omega}{c_2} 2a_2 \right) = A \left[\cos \frac{\omega}{c_1} 2a_2 + \operatorname{tg} \frac{\omega}{c_1} (a_1 + 2a_2) \sin \frac{\omega}{c_1} 2a_2 \right] \quad (2.62)$$

Друга половина граничних умов (2.54) дозволяє після диференціювання записати рівняння (2.62) в наступному вигляді:

$$C \left(\frac{D}{C} \cos \frac{\omega}{c_2} 2a_2 - \sin \frac{\omega}{c_2} 2a_2 \right) = A \frac{E_1 S_1 c_2}{E_2 S_2 c_1} \left[\operatorname{tg} \frac{\omega}{c_1} (a_1 + 2a_2) \cos \frac{\omega}{c_1} 2a_2 - \sin \frac{\omega}{c_1} 2a_2 \right] \quad (2.63)$$

Поділ виразу (2.62) на (2.63), а також врахування співвідношення (2.59) дає можливість отримати:

$$a_3 = \frac{c_3}{\omega} \operatorname{arctg} \frac{E_3 S_1 c_2 \left(N \cos \frac{\omega}{c_2} 2a_2 - \sin \frac{\omega}{c_2} 2a_2 \right)}{E_2 S_2 c_3 \left(N \sin \frac{\omega}{c_2} 2a_2 + \cos \frac{\omega}{c_2} 2a_2 \right)} \quad (2.64)$$

$$D_{\text{в}} = \frac{E_2 S_2 c_1 \left[\cos \frac{\omega}{c_1} 2a_2 + \operatorname{tg} \frac{\omega}{c_1} (a_1 + 2a_2) \sin \frac{\omega}{c_1} 2a_2 \right]}{E_1 S_1 c_2 \left[\operatorname{tg} \frac{\omega}{c_1} (a_1 + 2a_2) \cos \frac{\omega}{c_1} 2a_2 - \sin \frac{\omega}{c_1} 2a_2 \right]}$$

Для розрахунку поздовжнього розміру a_3 акустичної розрахункової схеми (рис. 2.35) за допомогою формули (2.64) необхідно задатися бажаними величинами товщини накладки, що понижує частоту, та маркою конструкційного матеріалу, з якого вона буде виготовлена, а також обрати марку п'єзокераміки з її параметрами.

Поздовжній розмір a_4 (рис. 2.35) ступеню малої площі трансформатора коливальної швидкості можна отримати із залежності

$$a_4 = \frac{c_3}{4f} \quad (2.65)$$

Розмір, розрахований відповідно до формули (2.65), необхідно скорегувати (зменшити) залежно від приєднаної маси на робочому торці трансформатора коливальної швидкості. Приєднана маса залежить від моди збуджуваних коливань та способу кріплення акустичної резонансної системи.

Інколи з метою зменшення габаритів та підвищення потужності проточного ультразвукового кавітаційного обладнання трубчасту кавітаційну камеру виконують з окремих ущільнених трубчастих кілець-вібраторів, довжина яких менша за $1/2$ згинальної хвилі деформації. Це дозволяє позбутися згинальних коливань по довжині циліндричної кавітаційної камери, а, відповідно, і зон з вузлами коливань, в області яких кавітація не збуджується [245 – 247].

Для перевірки коректності обмежень та припущень, використаних в наведеній методиці, було проведено моделювання роботи акустичної системи, що розглядається, в програмному середовищі Abaqus Student Edition 2018 (рис. 2.36, рис. 2.37, рис. 3.38).

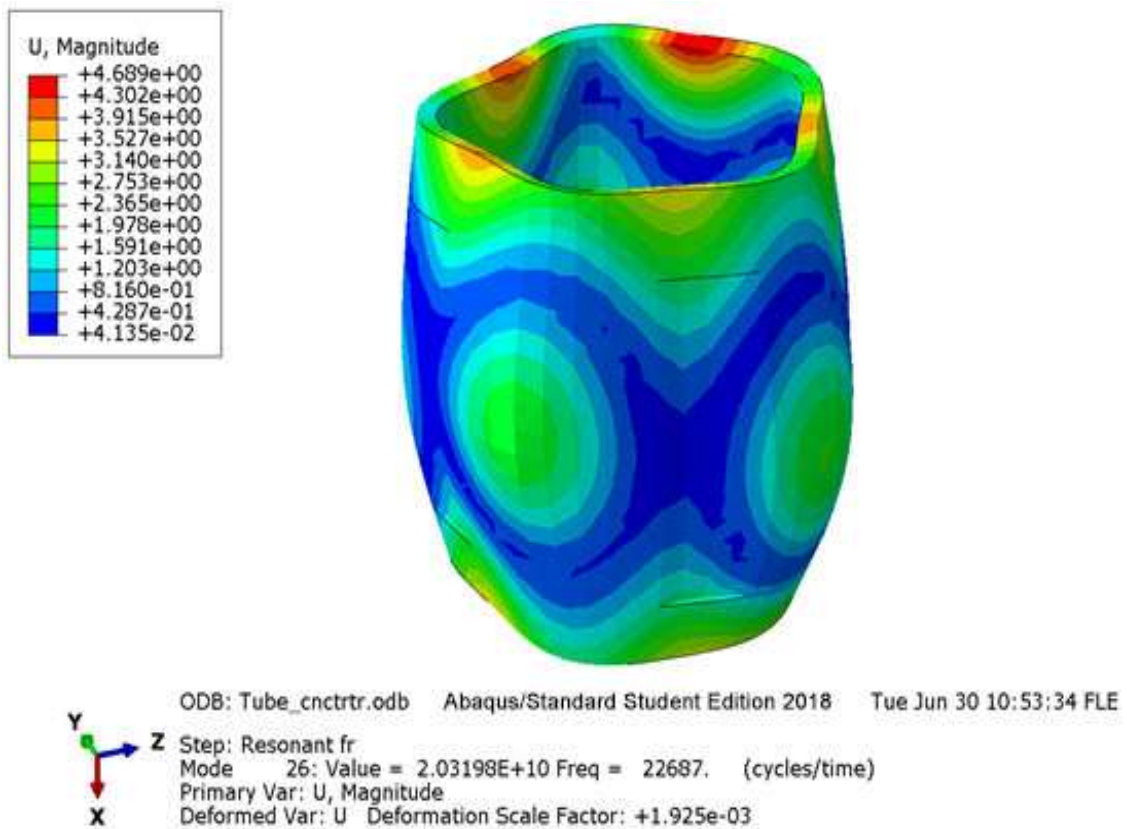


Рис. 2.36 – Моделювання роботи циліндричної камери, збудженої на радіально-згинальній моді коливань

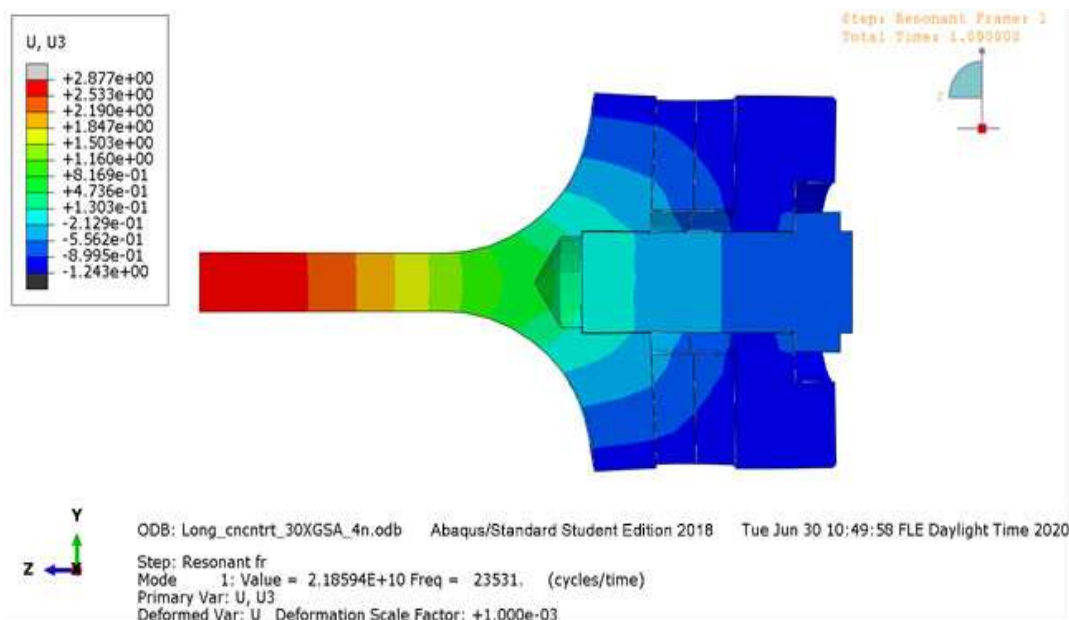


Рис. 2.37 – Моделювання роботи 1/2-хвильового привода-випромінювача поздовжніх коливань

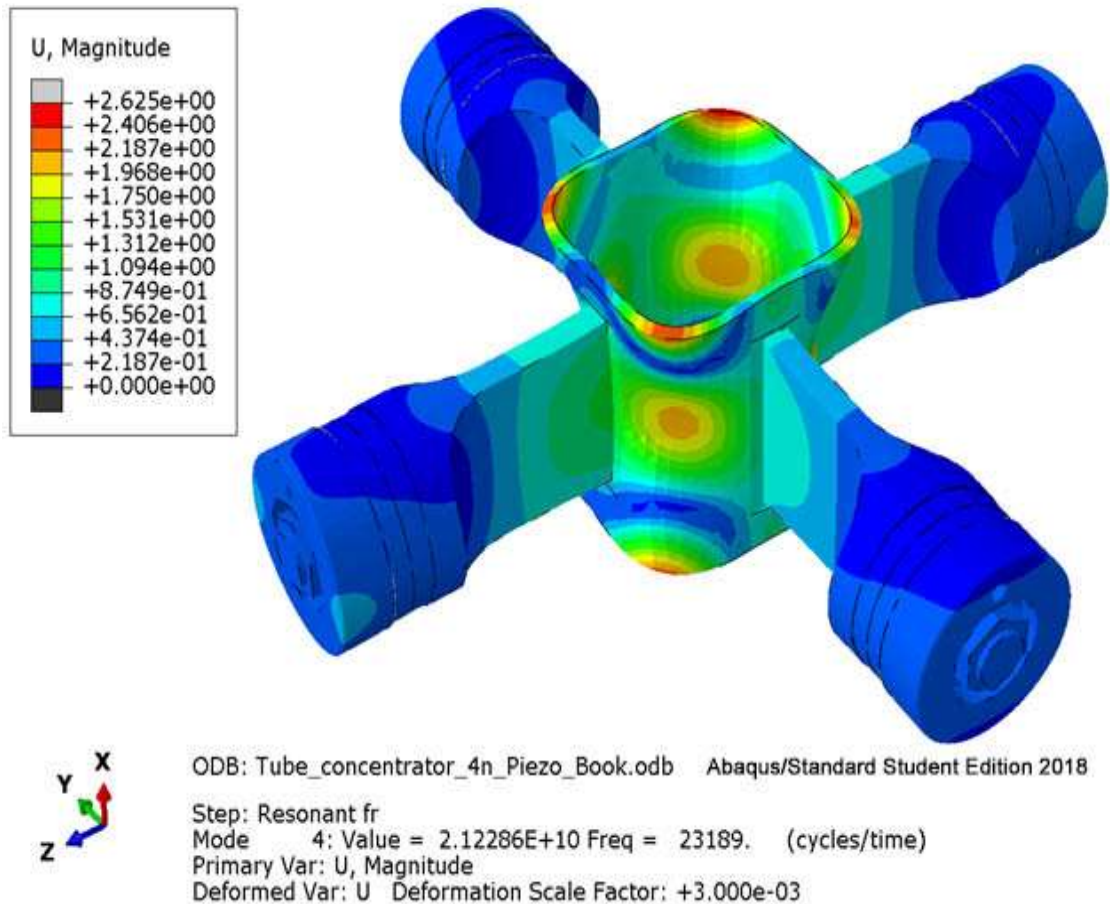


Рис. 2.38 – Моделювання роботи ультразвукової кавітаційної секції з трубчастим вібратором

Запропонована методика розрахунку ультразвукових проточних кавітаторів з трубчастим вібратором дозволила спроектувати та виготовити модульну кавітаційну секцію (рис. 2.39) для реалізації ультразвукових кавітаційних технологій.

Наступним кроком необхідно провести експериментальне дослідження ультразвукової кавітаційної секції.

Практична перевірка представленої методики розрахунку резонансних акустичних систем підтвердила її достатню точність за умови застосованих припущень.



Рис. 2.39 – Модульна ультразвукова кавітаційна секція з трубчастим вібратором

Це дозволило створити ефективне ультразвукове кавітаційне технологічне обладнання, яке знайшло впровадження в кавітаційних технологій в різних сферах.

2.5. Експериментальне дослідження роботи ультразвукового кавітаційного фільтра з ефектом самоочищення

При використанні явища ультразвукової кавітації для самоочищення фільтрувальних перегородок виникає загроза руйнування самих перегородок.

Для реалізації саморегенеруючого фільтру необхідно вирішити наступні питання:

- який конструкційний матеріал найбільш стійкий до ультразвукової кавітаційної ерозії?
- які фактори впливають на швидкість кавітаційної ерозії?

Для відповіді на ці питання були проведені дослідження, наведені нижче.

2.5.1. Дослідження впливу параметрів процесу ультразвукової кавітації на відносну втрату об'єму конструкційних матеріалів на основі планування багатофакторного експерименту

Незважаючи на значну кількість робіт [248 – 255], що вивчають механізми ультразвукової кавітації, ці питання вивчені не повністю.

Кавітаційний процес призводить до ультразвукової кавітаційної ерозії матеріалів, тобто до відносної втрати матеріалів, з яких виготовляють фільтрувальні перегородки. Причинами ускладнення дослідження є швидкоплинність цих процесів, а також те, що ультразвукова кавітаційна ерозія відбувається у незначних об'ємах. Руйнування кавітаційної бульбашки починається з розміру 10-2 мм. Додаткові ускладнення створюють значні локальні тиски та температури. Основними механізмами кавітаційної ерозії дослідники вважають механізм ударної хвилі [251, 256] та механізм ударних енергоємних мікроструменів [216, 227].

Для проведення експериментальних досліджень кавітаційної стійкості конструкційних матеріалів був розроблений стенд, який мав можливість змінювати інтенсивність ультразвукових коливань в широких межах. Для цього було запропоновано використати циліндричну кавітаційну камеру, яка збуджується на радіальній моді резонансних коливань за допомогою п'єзоелектричних приводів поздовжніх переміщень, встановлених на зовнішній твірній поверхні трубчастої камери (рис. 2.39). Звести до мінімуму спотворення коливань в місцях кріплення п'єзоелектричного приводу до зовнішньої твірної поверхні трубчастого вібратора пропонується за рахунок виконання

вихідного торця трансформатора швидкості у вигляді ножевидного профілю.

Внутрішня поверхня випромінювання трубчастого кавітатора забезпечує концентрацію ультразвукової енергії вздовж осі камери (рис. 2.40).

Резонансна частота власних коливань кавітаційної камери складала 22,5 КГц. Визначення геометричних розмірів запропонованої кавітаційної камери було виконано згідно з методикою, представленою в розділі 3 [257].

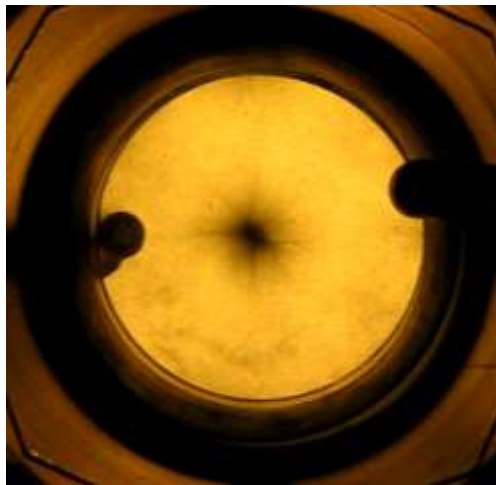


Рис. 2.40 – Кавітаційна область в центральній частині камери, яка збуджується на радіальній моді коливань (візуалізація виконана через торцеве скло)

Для експериментального дослідження за допомогою представленої циліндричної кавітаційної камери було спроектовано та виготовлено спеціальний стенд (рис. 2.41).

Уздовж осі камери встановлювався циліндричний випробуваний зразок, виконаний у вигляді стрижня діаметром 8 мм (рис. 2.42). В експериментальній установці інтенсивність ультразвуку можна було регулювати в межах 2...100 Вт/см² напругою живлення ультразвукових перетворювачів.

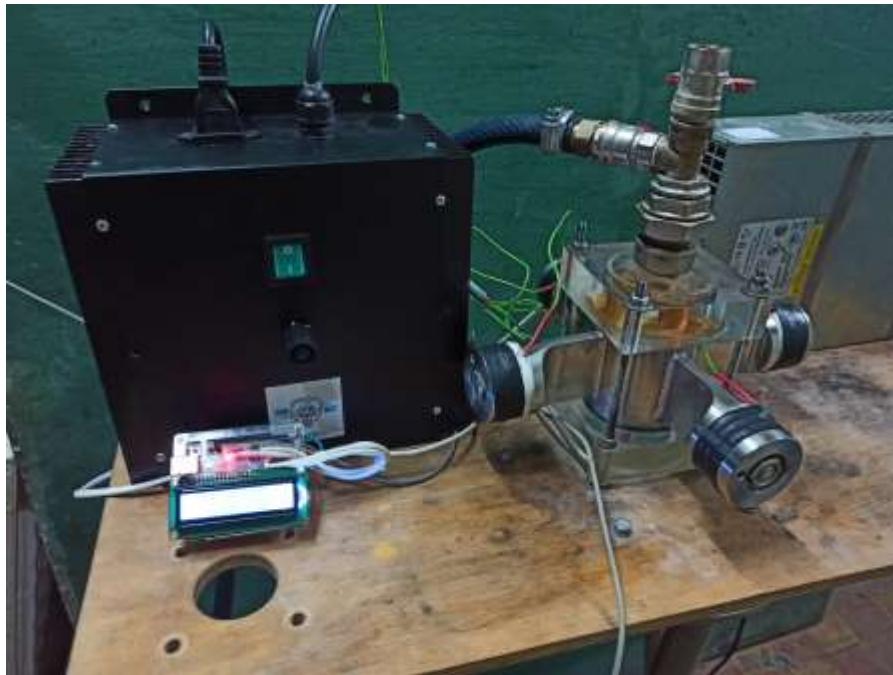


Рис. 2.41 – Зовнішній вигляд стенда для проведення експериментальних досліджень кавітаційній ерозії конструкційних матеріалів

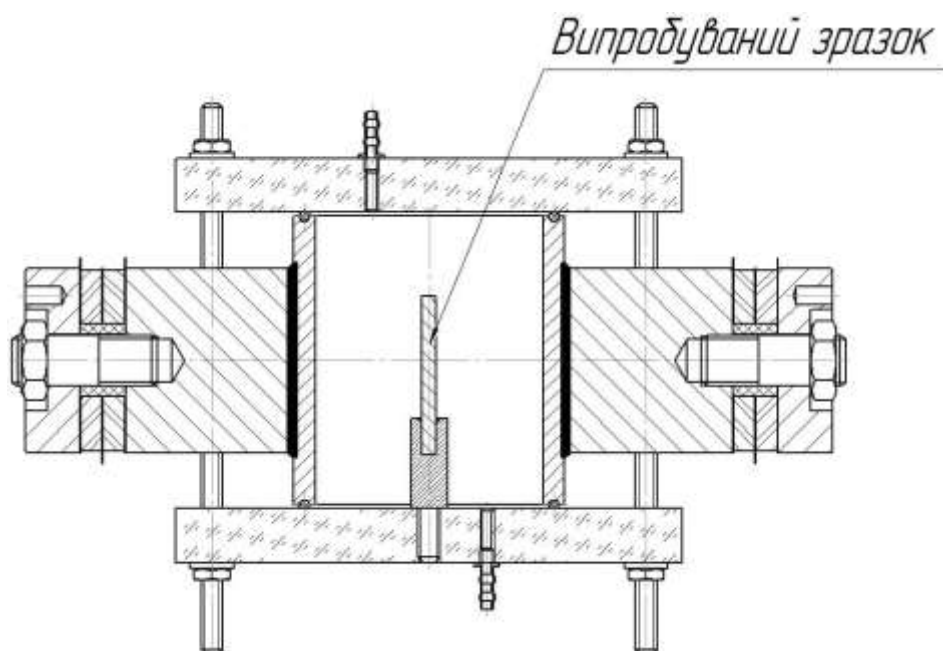


Рис. 2.42 – Ультразвукова установка для проведення експериментальних досліджень кавітаційній ерозії конструкційних матеріалів

Для підвищення достовірності результатів за рахунок стабілізації режиму кавітації в камері була створена замкнута система циркуляції робочої рідини, що забезпечило підтримку постійної кількості зародків кавітації (рис. 2.43).

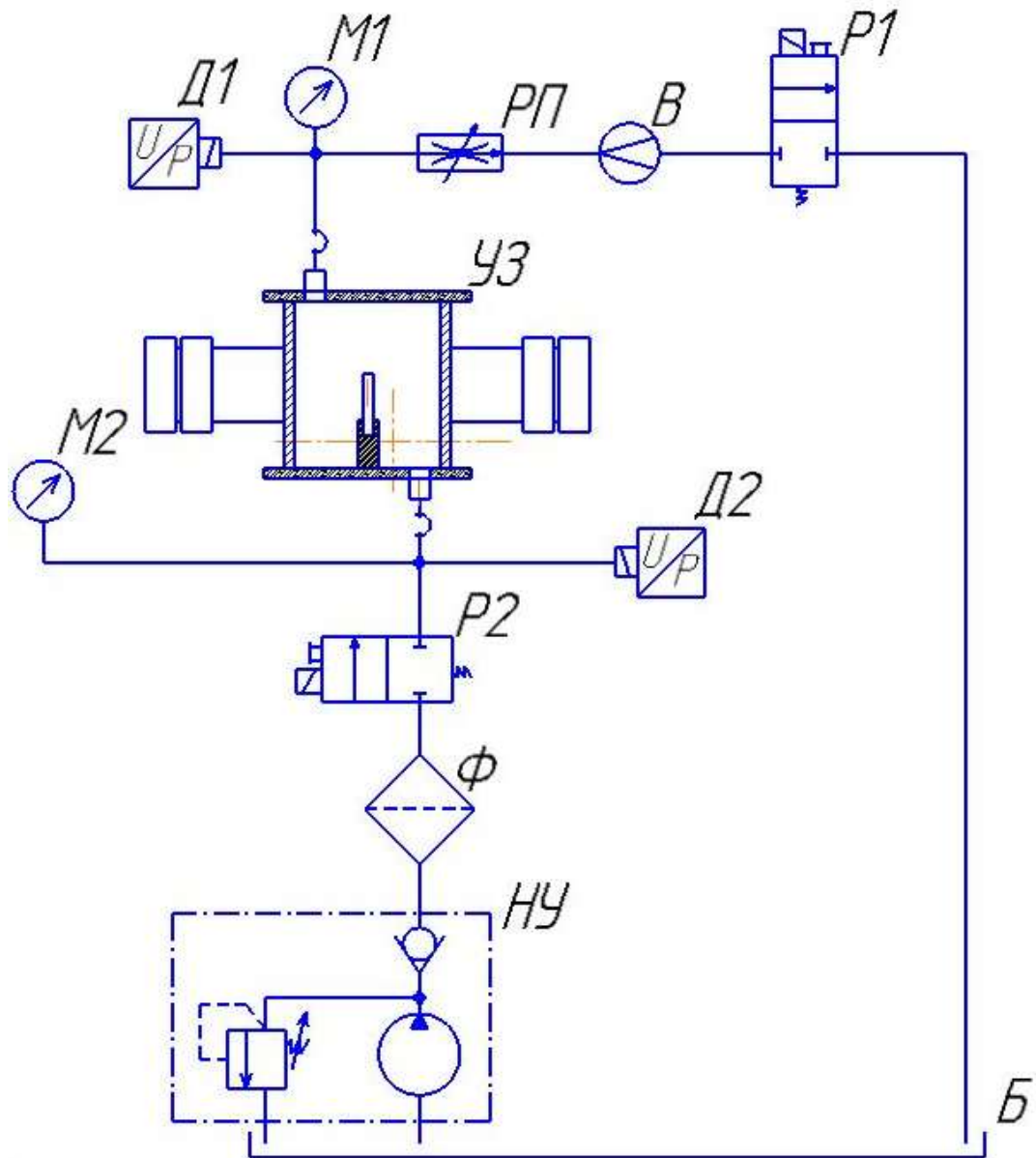


Рис. 2.43 – Принципова електрогидравлічна схема експериментального стенду (УЗ – ультразвукова камера, М1, М2 – манометри, Д1, Д2 – датчики, РП – розподільник потоку, В – витратомір, Р1, Р2 – розподільники, Ф – фільтр, НУ – насосна установка, Б – бак)

Щоб дослідити вплив ультразвукової кавітації на конструкційні матеріали було обрано декілька різних матеріалів і сплавів, що використовуються у машинобудуванні. При проведенні випробувань було обрано наступні умови: рідина – вода (H₂O); температура робочої рідини 293 К; тиск у випробувальній камері становив – 0,2 МПа [246]; час випробування – 0-240 хв; витрата рідини через випробувальну камеру 2 л/хв. У якості параметру оцінки ерозійної стійкості матеріалу, що досліджувався, було обрано кількість винесеного матеріалу у період розвиненої кавітації.

Усі експериментальні зразки конструкційних матеріалів, які зроблені у вигляді стрижнів, встановлювалися у центрі циліндричної ультразвукової камери, де спостерігається максимальна інтенсивність кавітації (рис. 2.42).

Перед кожним випробуванням дослідні зразки ретельно промивалися спиртом та висушувалися у сушильній шафі протягом 30 хв за температури 373 К. Зважування зразків проводилося до і після випробування за допомогою високоточних аналітичних ваг серії AXIS AD50. Ваги 4 класу точності дозволяють визначити вагу випробувального зразку з точністю до 0,001г. Зважування проводилось 5 разів для підвищення точності.

2.5.1.1. Обґрунтування методики моделювання

Попередні експериментальні дослідження [258] показали, що механізм кавітаційної ерозії в основному залежить від потужності кавітації (W , Вт), її тривалості (t , хв) та конструкційного матеріалу фільтрувальних перегородок, що характеризується модулем Юнга (E , ГПа) і описується функцією:

$$\Delta V = f(W, t, E)[\%] \quad , \quad (2.66)$$

де W – потужність кавітаційного пристрою, Вт; t – тривалість кавітації, хв; E – модуль Юнга, ГПа; ΔV – відносна втрата об'єму матеріалів;

Наведені результати попередніх досліджень показують, що подальше вивчення зміни об'єму матеріалів при кавітаційних процесах може здійснюватися одним з методів моделювання. Дослідження впливу перерахованих вище факторів на відносну втрату об'єму конструкційних матеріалів при проведенні однофакторних експериментів пов'язано із значними труднощами і об'ємами робіт. Тому доцільно провести багатфакторний експеримент для отримання рівняння регресії для функції відгуку – відносної втрати об'єму конструкційних матеріалів. Серед існуючих методів моделювання [259 – 261] процесу зміни відносного об'єму матеріалу фільтрувальних перегородок з різних конструкційних матеріалів при кавітації залежно від потужності кавітації та її тривалості може здійснюватися з використанням одного із алгоритмів групового врахування аргументів (МГВА) [262, 263], а саме МГВА з активними нейронами [264].

МГВА [263] можливо використовувати в різноманітних сферах для аналізу даних та знаходження закономірностей, прогнозування і моделювання систем, розпізнавання образів та оптимізації. МГВА відноситься до типу індуктивних алгоритмів, що дають можливість використовувати генератор моделей, які поступово ускладнюються, та вибору набору моделей, що мають найвищу точність наявних алгоритмів. МГВА складається з низки алгоритмів, що дозволяють вирішити широкий спектр завдань. В нього входять як параметричні алгоритми, так і алгоритми кластеризації, комплексування аналогів, ребінаризації та ймовірнісні алгоритми. Вхідні дані поділяються на навчальну та перевірочну множини. Навчальна множина призначена для знаходження коефіцієнтів моделі, в той час як перевірочна множина призначена для

визначення точності моделі на базі отриманих коефіцієнтів.

Існують два, найбільш розповсюджених, алгоритми МГВА:

- комбінаторний (спрощений метод);
- метод на базі активних нейронів.

Комбінаторний метод МГВА [264] - це поліноміальна функція з лінійними параметрами. Комбінаторна модель - це підмножина доданків поліноміальної функції, породженої заданим набором змінних.

Метод на базі активних нейронів [264], використовує комбінаторний алгоритм для оптимізації зв'язку нейронів. Алгоритм ітеративно створює шари нейронів з двома або більше входами. Алгоритм зберігає лише обмежений набір оптимально складних нейронів, які ми позначаємо як початкову ширину шару. Кожен новий шар створюється за допомогою двох або більше нейронів, взятих з будь-якого з попередніх шарів. Кожен нейрон в мережі застосовує функцію передачі (як правило, з двома змінними), що дозволяє вичерпному комбінаторному пошуку вибрати функцію передачі, яка найбільш точно прогнозує перевірочні дані. Функція передачі зазвичай має квадратичну або лінійну форму.

Перевагами алгоритмів МГВА є:

- побудова поліноміальних моделей будь-якої розмірності вихідних даних, коли невідомі структура моделі і коефіцієнти;
- використання неоптимальних статичних планів проведення експериментів та статичної інформації діючих процесів;
- побудова моделей на коротких вибірках інформації.

Побудова моделей з використанням алгоритмів МГВА здійснюється на основі поділу інформаційних даних на дві послідовності - навчальну та перевірочну.

Незалежно від активного чи пасивного експеримента при моделюванні з використанням МГВА необхідно:

- вибрати кількість досліджуваних змінних;
- визначитися з межами їх зміни;
- визначити рівні зміни факторів;
- визначити загальну кількість експериментів.

Використання алгоритмів МГВА не обмежує для моделювання процесів кількість змінних (факторів). Обмеження кількості змінних обумовлюється метою моделювання та можливістю практичної інформації.

При дослідженні зазначеного процесу відповідно до (2.66) кількості досліджуваних змінних (факторів) дорівнює трьом. Межі зміни цих факторів обумовлюються межами зміни W , t і E , при яких одержана функція (2.66). Згідно [258] регресійна модель побудована в межах зміни:

- W , потужність ультразвукового кавітаційного пристрою – 160...400 Вт;
- t , час обробки в кавітаційному середовищі – 0...240 хв;
- E , модуль Юнга матеріалу – 55...215 ГПа.

У цьому дослідженні зазначені межі зміни W , t і E і обумовлюють вибір меж зміни цих факторів при моделюванні процесу ультразвукової кавітації ерозії. Регресійна модель буде достовірною в даних межах.

Досвід попереднього моделювання різних процесів показує, що задовільні результати можна одержати при зміні факторів на п'яти рівнях і п'яти-шести точках (експериментів) на один фактор [265].

При виборі комбінацій і масштабного простору, у якому вводиться в алгоритмах МГВА вихідна інформація, бажано враховувати попередній досвід, яким описується досліджуваний процес.

Для зручності подальшого конструювання фільтрувальної установки, втрата об'єму матеріалу внаслідок кавітаційної ерозії доцільно розраховувати в безрозмірному вигляді.

Згідно з (2.66) в якості вектора вихідних даних при визначенні моделей будуть:

$$x_1' = W, x_2' = t, x_3' = E \quad . \quad (2.67)$$

Збільшення рядів селекції (ускладнення моделі) здійснюється до тих пір, поки зменшується похибка апроксимації.

Одержана модель аналізується з точки зору її можливостей опису фізичної сутності. При цьому, перш за все, перевіряються найбільш загальні положення та вимоги.

За даними аналізу проводиться корегування структури моделі та уточнюються її коефіцієнти.

Відкоригована по структурі та уточнена модель перевіряється експериментально та підлягає статичній перевірці дослідженому процесу.

2.5.1.2. Математична модель ультразвукового кавітаційного процесу

Побудова математичної моделі впливу параметрів кавітації ультразвукової кавітації на втрату об'єму ΔV конструкційних матеріалів передбачає встановлення взаємозв'язку між параметрами процесу (W - потужність, t - час, E – модуль Юнга).

Метою моделювання є визначення впливу параметрів ультразвукового кавітаційного реактора на втрату об'єму різних матеріалів і на цій основі розробка рекомендацій з вибору матеріалів і умов утворення ультразвукової кавітації. Моделювання проводилось з використанням кавітаційного пристрою з регульованою потужністю від 100 Вт до 400 Вт на матеріалах з різними значеннями Юнга.

В якості вихідного параметра моделі (y) прийнята відносна втрата об'єму при ерозії - ΔV , виміряна в %. Границі змінних наведені в

таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Фактори, досліджувані при математичному моделюванні

Фактори	Нижній	Верхній
W, Вт	100	400
t, хв	0,01	240
E, ГПа	50	250

Зазначені змінні вводились в програму спрощеного МГВА на базі активних нейронів GDMH Shell DS 3.8.9 [266] рис. 2.44 в масштабному просторі, визначеному (2.67). Матриця експериментальних даних наведена в табл. 2.5.

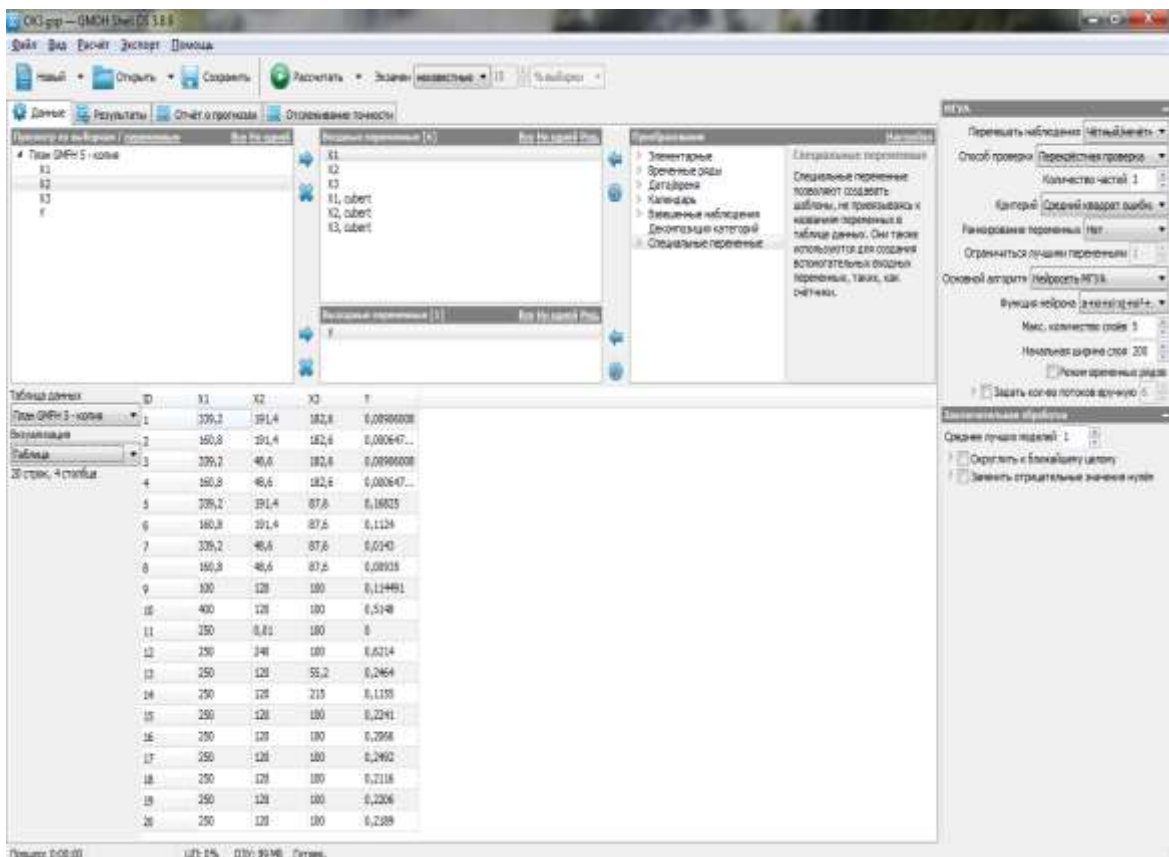


Рис. 2.44 – Введення даних в програму GDMH Shell DS 3.8.9

Задача синтезу моделі з використанням спрощеного алгоритму МГВА полягає в побудові функції

$$F(x'_1 = W, x'_2 = t, x'_3 = E) = M(\bar{x}') \quad , \quad (2.68)$$

де $M(\bar{x}')$ – математичне очікування середньої величини y' ,
 $F(x'_1 = W, x'_2 = t, x'_3 = E)$ – невідомий по структурі та по виду оператор (функціональний зв'язок).

У результаті обробки експериментальних даних при досягненні мінімального значення похибки апроксимації (табл. 2.6) на п'ятому ряду селекції була одержана модель процесу ультразвукової кавітаційної ерозії виду.

Таблиця 2.5 – Інформаційна матриця експериментальних даних

№	Функції			Прийняті значення x			Y, %
	W, Вт	t, хв	E, ГПа	x'_1	x'_2	x'_3	
1	2	3	4	5	6	7	8
1	339,2	191,4	182,6	339,2	191,4	182,6	0,00906008
2	160,8	191,4	182,6	160,8	191,4	182,6	0,00064715
3	339,2	48,6	182,6	339,2	48,6	182,6	0,00906008
4	160,8	48,6	182,6	160,8	48,6	182,6	0,00064715
5	339,2	191,4	87,6	339,2	191,4	87,6	0,16825
6	160,8	191,4	87,6	160,8	191,4	87,6	0,1124
7	339,2	48,6	87,6	339,2	48,6	87,6	0,0143
8	160,8	48,6	87,6	160,8	48,6	87,6	0,00935
9	100	120	100	100	120	100	0,11449062
10	400	120	100	400	120	100	0,5148

Продовження таблиці 2.5

1	2	3	4	5	6	7	8
11	250	0,01	100	250	0,01	100	0
12	250	240	100	250	240	100	0,6214
13	250	120	55,2	250	120	55,2	0,2464
14	250	120	215	250	120	215	0,1155
15	250	120	100	250	120	100	0,2241
16	250	120	100	250	120	100	0,2066
17	250	120	100	250	120	100	0,2492
18	250	120	100	250	120	100	0,2116
19	250	120	100	250	120	100	0,2206
20	250	120	100	250	120	100	0,2189

Таблиця 2.6 – Точність отримана в результаті моделювання

Максимальне від'ємне відхилення	-0,0256186
Максимальне додатне відхилення	0,0205366
Середній модуль помилки (MAE)	0,00823742
Середньоквадратичне відхилення (RMSE)	0,010939
Сума відхилень	3,98293E-15
Стандартне відхилення залишків	0,0110594
Коефіцієнт детермінації (R ²)	0,995587
Кореляція	0,997791

$$y = -0.00665342 + 1.43019n_{47} + 6.46994n_{47}n_{15} - 6.66151n_{47}^2 - 0.345979n_{15}$$

$$n_{15} = 0.169846 - 0.00166224x_1 + 0.00419129x_1n_{47} + 3.50203e^{-6}x_1^2$$

$$n_{47} = 0.0241886 + 15.5951n_{92} - 2986.3n_{92}n_{96} + 1524.51n_{92}^2 - 15.4387n_{96} + 1461.96n_{96}^2$$

$$n_{96} = -0.00206682 - 0.743211\sqrt[3]{x_3}n_{117} + 4.60507n_{117} \quad (2.69)$$

$$n_{92} = -0.00406738 + 6.27789n_{116}n_{117}$$

$$n_{116} = 0.345412 - 0.00154868x_3$$

$$n_{117} = -0.0460626 + 0.00894853\sqrt[3]{x_2^2}$$

У результаті підстановки натуральних значень \bar{x} модель (2.69) відносної втрати об'єму конструкційних матеріалів відповідно до проведеного моделювання набула вигляд:

$$y = -0.00665342 + 1.43019n_{47} + 6.46994n_{47}n_{15} - 6.66151n_{47}^2 - 0.345979n_{15}$$

$$n_{15} = 0.169846 - 0.00166224W + 0.00419129Wn_{47} + 3.50203e^{-6}W^2$$

$$n_{47} = 0.0241886 + 15.5951n_{92} - 2986.3n_{92}n_{96} + 1524.51n_{92}^2 - 15.4387n_{96} + 1461.96n_{96}^2$$

$$n_{96} = -0.00206682 - 0.743211\sqrt[3]{E}n_{117} + 4.60507n_{117} \quad (2.70)$$

$$n_{92} = -0.00406738 + 6.27789n_{116}n_{117}$$

$$n_{116} = 0.345412 - 0.00154868E$$

$$n_{117} = -0.0460626 + 0.00894853\sqrt[3]{t^2}$$

Порівняння значень, отриманих в результаті експерименту зі значеннями розрахованих за моделлю представлені на рис. 2.45.

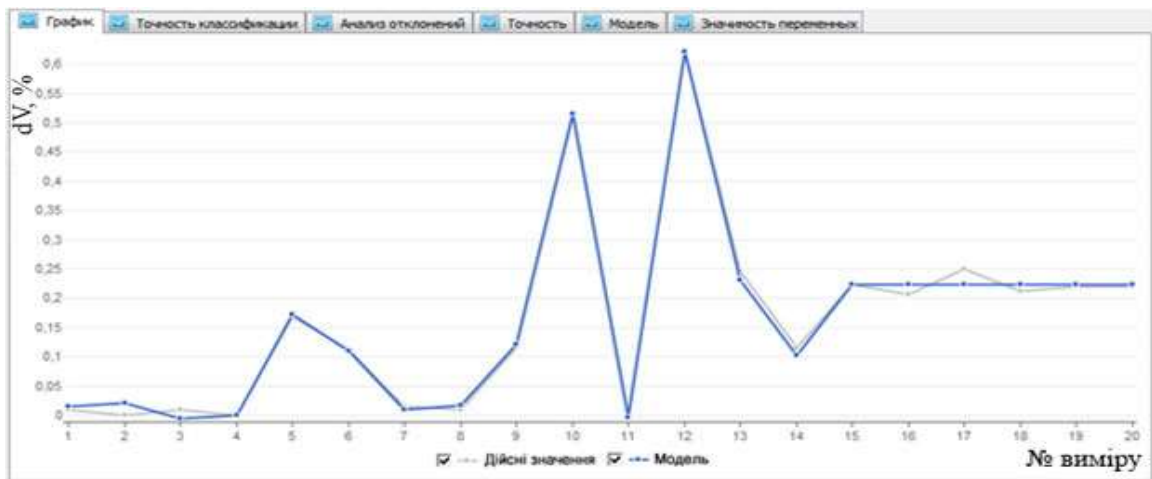


Рис. 2.45 – Графік порівняння значень, отриманих в результаті експерименту зі значеннями розрахованих за моделлю.

Після перевірки адекватності ця модель була прийнята для подальшого аналізу впливу параметрів процесу на відносну втрату об'єму матеріалу (ΔV) при ультразвуковій кавітації. Коефіцієнт кореляції склав $R=0,997$, що свідчить про високу точність одержаних результатів.

Як видно з рис. 2.46, серед досліджених параметрів найбільше на відносну втрату об'єму конструкційних матеріалів впливає Модуль Юнга матеріалу, а найменше – потужність кавітації.

<input checked="" type="checkbox"/> Графік <input checked="" type="checkbox"/> Точність класифікації <input checked="" type="checkbox"/> Аналіз відхилень <input checked="" type="checkbox"/> Точність <input checked="" type="checkbox"/> Модель <input checked="" type="checkbox"/> Значимість перемінних				
Вклад				
Частота				
№	Если заместить средним значением	Влияние на СКО	Графически	СКО
1	X3	6,92E05%		1319,04
2	X3, cubert	4,402E05%		838,972
3	X2, cubert	58,49%		0,122424
4	X1	31,56%		0,0711011
	[Ничего не замещено]	0%		0,010939
	[Замещено всё]	100%		0,201543

Рис. 2.46 – Вплив факторів моделі на відносну втрату об'єму матеріалу (ΔV) ($X1$ – Потужність, $X2$ – час обробки, $X3$ – модуль Юнга)

Після обробки отриманих результатів було побудовано ряд графічних залежностей, які дають нам чітку картину стійкості конструкційних матеріалів в кавітаційній камері при різних потужностях (рис. 2.47 і рис. 2.48).

Методом планування багатofакторного експерименту було отримано рівняння регресії, яке дозволяє адекватно описати залежність такої цільової функції, як відносна втрата об'єму конструкційних матеріалів від основних параметрів впливу, таких, як потужність кавітаційного пристрою, тривалість кавітації та модуль Юнга і може бути

використане для математичного моделювання процесу ультразвукової кавітації.

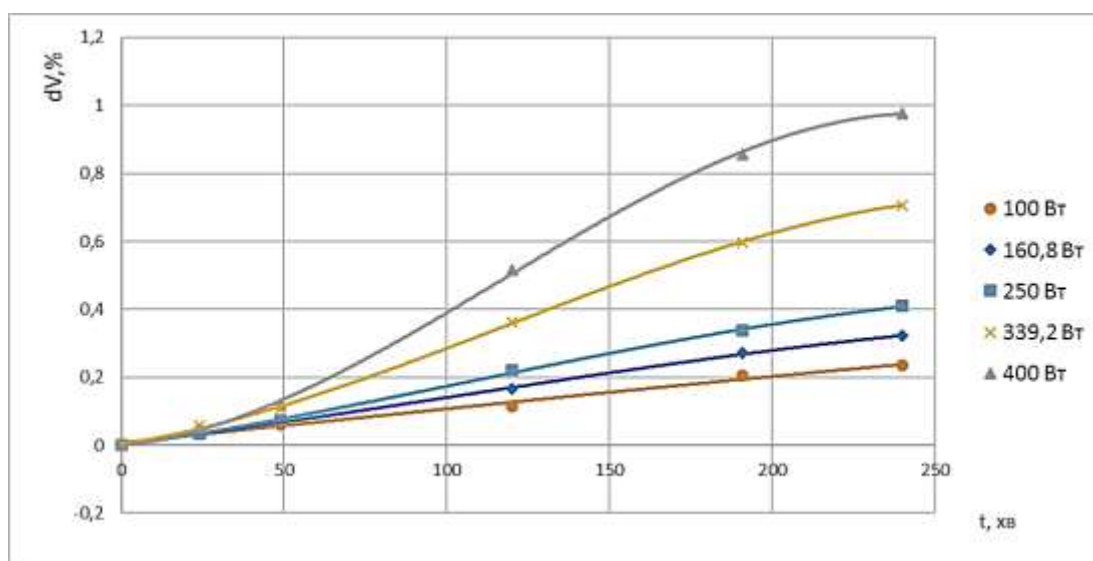


Рис. 2.47 – Залежність втрати маси зразку з чавуну СЧ20 від часу обробки при різних потужностях ультразвукового кавітатора

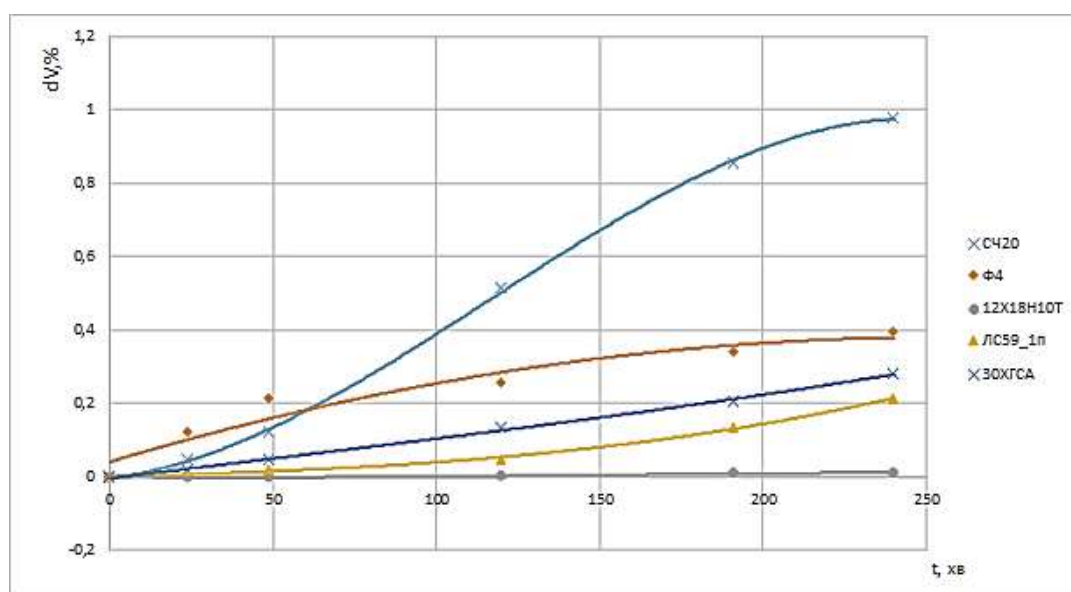


Рис. 2.48 – Залежність втрати маси досліджуваного зразка від часу обробки при споживаній потужності ультразвукового кавітатора 400 Вт

Встановлено, що серед досліджених параметрів найбільше на відносну втрату об'єму конструкційних матеріалів впливає Модуль Юнга матеріалу зразка, а найменше – потужність кавітаційного генератора.

Отримані результати дозволяють оцінити кавітаційну стійкість конструкційних матеріалів і виконати обґрунтований вибір матеріалів для застосування в ультразвуковому технологічному обладнанні. В результаті найбільш доцільним матеріалом для використання в ультразвукових кавітаційних фільтрах є сталь 12Х18Н10Т. Фторопласт Ф4, який спочатку планувалося використовувати, показав найгірший результат, що знизило доцільність його використання. Для підвищення довговічності і надійності ультразвукового кавітаційного обладнання необхідно розширити кількість типів випробовуваних матеріалів, наприклад, залучити різні марки титану, поліпропілени та збільшити тривалість випробувань, оскільки отримані результати по витраті конструкційних матеріалів під дією кавітації ерозії свідчать, що для окремих, нехай навіть кавітаційно стійких матеріалів характерним є вплив втомної міцності при досягненні якої настає інтенсивне руйнування матеріалу.

2.5.2. Дослідження впливу статичного тиску на інтенсивність ультразвукової кавітації

Ефективний спосіб підвищення інтенсивності кавітаційного впливу в звуковому полі запропонували Агранат Б.А., Башкіров В.І., Израїлович Я.І., Китайгородский Ю.І. і Кутузов А.В. [267]. Авторами розроблений метод інтенсифікації ультразвукової кавітації шляхом одночасного підвищення інтенсивності ультразвуку за рахунок збільшення амплітуди коливань випромінюючого перетворювача і збільшення статичного тиску в рідині.

Представлене авторами експериментальне підтвердження запропонованого методу [268 – 272] показує, що при збільшенні статичного тиску до рівня 0.4 ... 0.5 від звукового тиску кавітаційна ерозія посилюється в 20 ... 30 разів. Інтенсифікацію кавітаційного впливу при підвищенні надлишкового статичного тиску автори пояснюють тим, що зі збільшенням статичного тиску зменшується мінімальний радіус R_{\min} , що досягається бульбашкою при стисненні. Зменшення R_{\min} в кінцевій стадії стиснення значно збільшує дію сил поверхневого натягу, що сприяє підвищенню радіальної швидкості руху стінки порожнини в момент її сплескування. У напівперіод розтягування при підвищеному статичному тиску зменшується величина максимального радіуса бульбашки R_{\max} . Однак, зниження інтенсивності, викликане зменшенням R_{\max} , з надлишком компенсується підвищенням інтенсивності через зменшення R_{\min} [203].

Підвищення інтенсивності ультразвукової кавітації (числа кавітації) шляхом зміни статичного тиску має нелінійний характер. Саме цей факт вимагає проведення додаткового дослідження.

Для досягнення високої ефективності технологічного обладнання, що реалізує ультразвукову кавітаційну обробку, необхідно розуміння особливостей утворення звукового поля в технологічному об'ємі при різних рівнях інтенсивності ультразвукових коливань. Для створення технологічного кавітаційного обладнання важлива інформація про форму та ерозійну активність кавітаційної області, а також вплив на режим кавітації статичного тиску.

Для уточнення даних щодо впливу підвищеного і пониженого тиску на процес протікання ультразвукової кавітації була розроблена експериментальна установка, схема якої представлена на рис. 2.49.

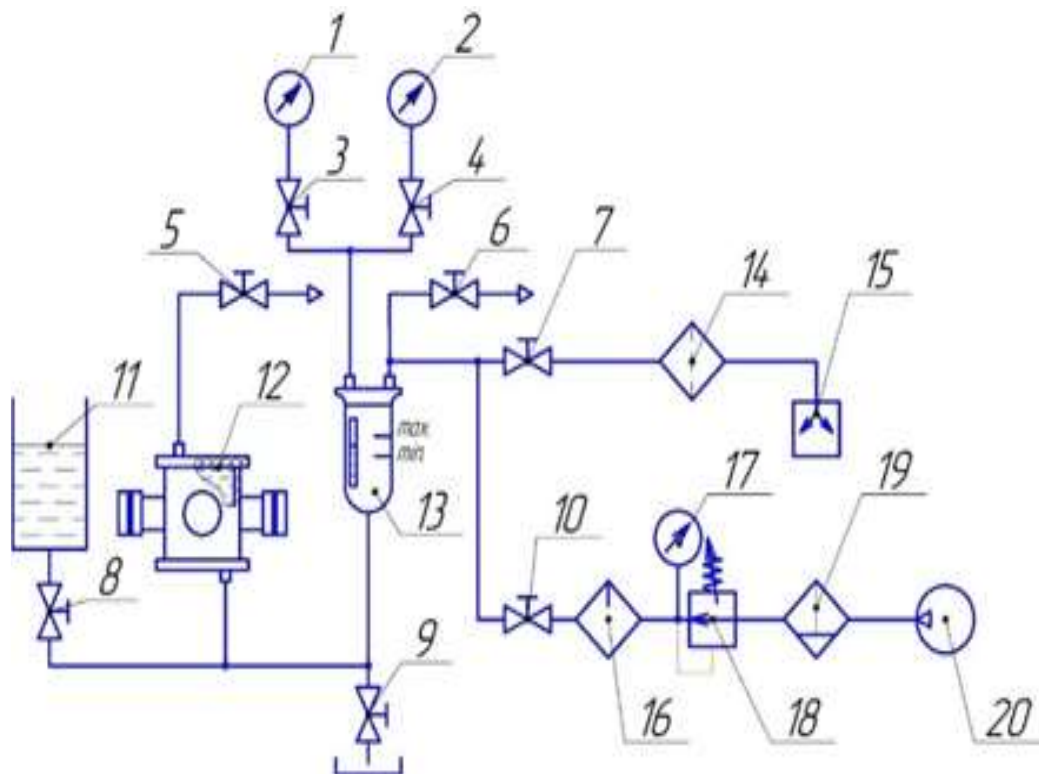


Рис. 2.49 – Схема експериментального стенду для дослідження впливу статичного тиску на особливості ультразвукової кавітації. (1-манометр, 2-вакуумметр; 3-10-крани, 11-резервуар для робочої рідини, 12-ультразвуковий трубчастий вібратор, 13 - ємність контролю рівня заповнення; 14-фільтр, 15-вакуумний насос, 16-19-блок підготовки стисненого повітря, 20-компресор)

Установка дозволяє проводити дослідження як при підвищенні робочого тиску за допомогою компресора 20, так і при зниженні його нижче атмосферного завдяки вакуумному насосу 15. Всі елементи з'єднані між собою мідними трубками, що запобігає їх деформації при зміні статичного тиску. Додаткова ємність 13 розташована на одному рівні з резервуаром 11 і одночасно знаходиться вище ультразвукового трубчастого вібратора 12. Це дозволяє повністю заповнити робочу камеру рідиною і запобігти потраплянню бульбашок повітря всередину. При такому розташуванні всередині ємності 13 утворюється замкнута

повітряна порожнина, яка дозволяє контролювати рівень заповнення установки робочою рідиною і запобігає її потраплянню в вимірювальні прилади 1, 2 і пневматичну апаратуру 15-20. У схемі задіяний додатковий фільтр 14, який захищає вакуумний насос від випадкового крапельного попадання рідини.

Загальний вигляд випробувального стенду представлений на рис. 2.50.

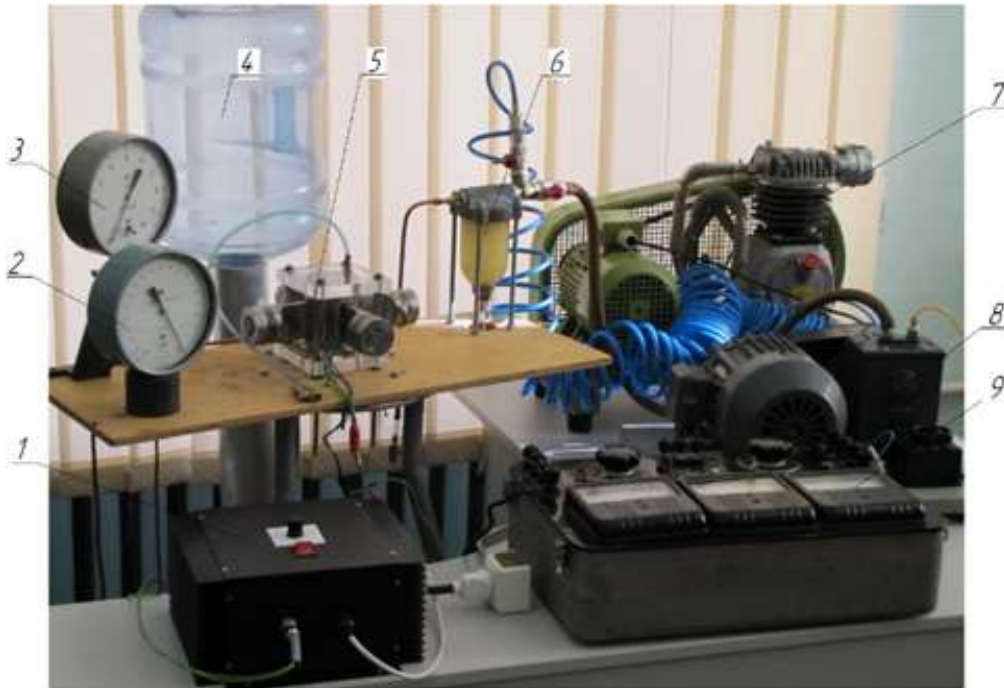


Рис. 2.50 – Загальний вигляд експериментального стенду (1 - блок електроніки, 2 - вакуумметр, 3 - манометр, 4 - бак, 5 - кавітатор, 6 - сміть контролю рівня заповнення, 7-компресор, 8-вакуум-насос, 9 - вимірювальна станція)

Для експериментального підтвердження впливу статичного тиску на інтенсивність кавітаційних процесів було проведено дві серії експериментів. Одна серія була присвячена дослідженню інтенсивності кавітаційної ерозії при зниженні тиску нижче атмосферного (рис. 2.51), а друга - при підвищенні надлишкового тиску (рис. 2.52).



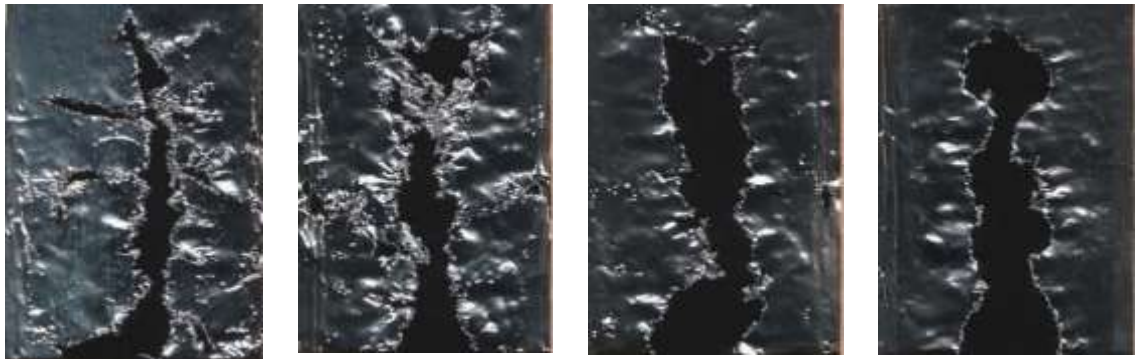
0,065 МПа

0,075 МПа

0,085 МПа

0,095 МПа

Рис. 2.51 – Зміна площі кавітаційного руйнування тестової фольги при різних рівнях пониженого тиску



0 МПа

0,05 МПа

0,1 МПа

0,15 МПа



0,2 МПа



0,25 МПа



0,3 МПа

Рис. 2.52 – Зміна площі кавітаційного руйнування тестової фольги при різних рівнях надлишкового тиску

При цьому звуковий тиск, температура, частота коливань, тривалість обробки і характеристики рідини підтримувалися постійними.

В якості тестових зразків в експериментах була обрана алюмінієва фольга.

В якості робочої рідини використовувалася вода при температурі 293К. Кожен зразок піддавався озвучуванню ультразвуковим випроміненням протягом 10 сек. Час визначався за допомогою таймера, який сигналізував про закінчення кожного окремого експерименту. Резонансну частоту коливань в 22.4 кГц автоматично підтримувала електронна система керування. В ході експериментів було виявлено, що частинки ерозійно зруйнованої фольги, які залишаються на стінках камери, при проведенні наступного експерименту виступають в якості абразивних включень, кількість зародків кавітації в об'ємі камери не є постійними. Тому робоча рідина при кожному експерименті замінювалася, а стінки трубчастого вібратора ретельно очищувалися від різного роду механічних забруднень.

Усередині камери ультразвукового трубчастого вібратора уздовж його вертикальної осі розміщувалася тестова алюмінієва фольга, яка закріплювалася на спеціальній рамці. Фольга після повного заповнення камери водою була піддана ультразвуковому озвученню при різних значеннях статичного тиску, створюваного за допомогою компресорної установки (в разі підвищення статичного тиску) і за допомогою вакуумного насоса (при розрідженні). Під час експерименту надлишковий тиск змінювався в межах 0 ... 0,3 МПа з кроком 0,05 МПа, а зменшення тиску відбувалося в межах 0,095 ... 0,065 МПа з кроком 0,01 МПа. Споживана потужність ультразвукового генератора підтримувалася постійною на рівні 200 Вт. При подальшому зниженні тиску кавітаційної ерозії не спостерігалось. Кожен експеримент з тестової фольгою дублювався три рази. Отримані зразки були оцифровані і переведені в графічний вигляд. Для визначення зруйнованої

площі використовувався пакет програм MATLAB. Визначення площі руйнування відбувалося за рахунок розрахунку кількості світлих та темних пікселів у оцифрованому зображенні. Для підтвердження достовірності визначення площі був використаний пакет програми Photoshop CS6 portable. Відмінність між автоматичним розрахунком пакета MATLAB і ручним визначенням за допомогою гістограми зображення в Photoshop CS6 portable склала 1-2%.

Оброблені і усереднені результати проведеного експериментального дослідження були представлені у вигляді графічної залежності площі ерозійного руйнування алюмінієвої тестової фольги від зміни статичного тиску на рис. 2.53.

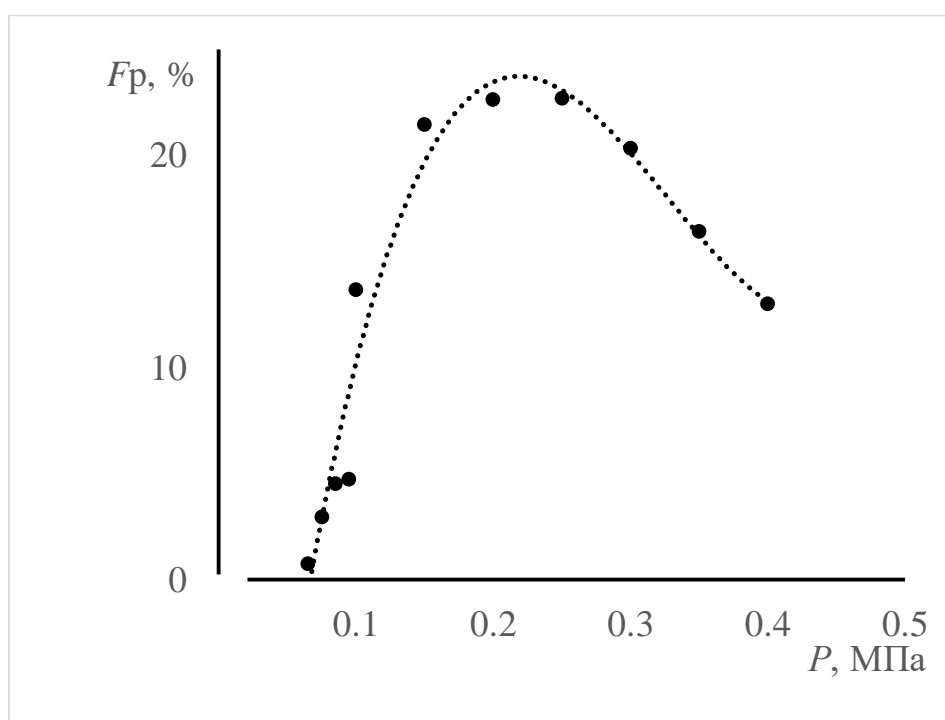


Рис. 2.53 – Залежність площі ерозійного руйнування алюмінієвої фольги від зміни статичного тиску

Експериментальним шляхом доведено вплив статичного тиску на

інтенсивність ультразвукової кавітації. Показано зміну ерозійної активності кавітації при зміні статичного тиску в межах 0,065 ... 0 МПа і 0 ... 0,3 МПа щодо атмосферного.

Нелінійність зміни інтенсивності кавітаційних явищ можна пояснити тим, що внутрішній надлишковий тиск навантажує одностороннім зусиллям трубчастий вібратор, що здійснює радіальні коливання. Що при постійній підведеній потужності призводить до зменшення амплітуди коливань і, відповідно, до зменшення інтенсивності ультразвукової хвилі, випромінюваної всередину кавітаційної камери. Цю ситуацію можна розглядати як вплив конструктивних особливостей кавітаційної камери на інтенсивність кавітаційних процесів при зміні статичного тиску.

Крім того, інтенсивність кавітаційної ерозії пов'язана з числом кавітації, яке враховує співвідношення статичного тиску і звукового тиску в кавітаційній камері і виражається залежністю [92]:

$$k = \frac{P_0 - P_n}{P_a} \quad , \quad (2.71)$$

P_n – тиск насиченої пари; P_a – амплітудне значення звукового тиску; P_0 – статичний тиск середовища.

Таким чином, при розробці кавітаційних камер для технологічних процесів необхідно враховувати як конструктивні параметри кавітаційного обладнання, так і число кавітації, пов'язане з співвідношенням статичного і звукового тиску.

2.5.3. Дослідження впливу розташування фільтрувальної перегородки на стоячу хвилю

Створення ультразвукової кавітації в технологічному об'ємі можливо з утворенням стоячої або рухомої ультразвукової хвилі. У фізиці стояча хвиля [273], також відома як нерухома хвиля, - це хвиля, яка коливається в часі, але профіль амплітуди не поширюється в просторі. Пікова амплітуда коливань хвилі в будь-якій точці простору є постійною з часом, а коливання в різних точках по всій хвилі знаходяться у фазі. Особливістю такої хвилі є утворення в ній вузлів, де амплітуда дорівнює нулю, та пучностей з максимальною амплітудою. При утворенні стоячої хвилі положення вузлів та пучностей лишається незмінним у просторі. Стояча хвиля утворюється внаслідок накладання двох рухомих хвиль, такі хвилі повинні рухатися назустріч одна одній та мати незначний зсув фази. У рухомій хвилі енергія переноситься у всьому об'ємі, а в стоячій хвилі через площини, де розташовані вузли, енергія не перетікає.

Для створення ультразвукового кавітаційного фільтру необхідно дослідити механізм утворення стоячої хвилі та дослідити оптимальне місце розташування фільтрувальної перегородки в ультразвуковому кавітаційному середовищі при утворенні в ньому стоячої хвилі.

Математично було розраховано, що для отримання повздовжніх, майже поршневих коливань, діаметр концентратора (d_k) і діаметр випромінювача (d_b) повинні бути меншими половини довжини хвилі (λ) в рідині (λ_p) і по довжині випромінювача (λ_b) відповідно $d_k < 1/2\lambda_p$, $d_b < 1/2\lambda_b$.

Якщо ж ці розміри не врахувати, тобто приймати $d_k > 1/2\lambda_p$, $d_b > 1/2\lambda_b$, то коливання матимуть боковий напрям (розсіяння), за таких умов хвилі

будуть розходитися в різні боки, втрачаючи інтенсивність. При цьому в осьовому напрямку ми отримаємо лише проекції швидкостей (їх складові). Загалом це призводить до втрати ККД випромінювача.

Також за теоретичними даними на поверхні випромінення повинен бути максимум швидкості, а на дні концентратора мінімум. Але тоді виникало питання: «як відбувається відбиття хвилі від торцевої донної поверхні?»

Для вирішення поставленої задачі та підтвердження математичних розрахунків були збудовані стенди для експериментального дослідження реальної картини проходження ультразвукової хвилі крізь різні рідини (зокрема: вода, бензин, дизпаливо).

Спочатку досліди проводилися із залученням ультразвукового випромінювача з діаметром поверхні випромінювача меншим за довжину цілої хвилі та діаметром кавітаційної камери, що дорівнює 75мм. Попередньо виміряна довжина хвилі на частоті 26 кГц у бензині становила $\lambda = 33$ мм.

Відстань від поверхні випромінювання, яка розташована у верхній частині стакана, до донної поверхні становила

$$\begin{aligned}L1 &= n \cdot \lambda = 2 \cdot 33 = 66 \quad \text{мм}, \\L2 &= n \cdot \lambda - \lambda / 4 = 2 \cdot 33 - 33 / 4 = 58 \quad \text{мм}; \\L3 &= n \cdot \lambda + \lambda / 4 = 2 \cdot 33 + 33 / 4 = 74 \quad \text{мм}.\end{aligned} \tag{2.72}$$

Кількість півхвиль $n = 2$.

Для визначення пучностей тиску в рідині використовувалася п'єзокерамічний гідрофон. Ми дослідили та довели, що довжина хвилі не відповідала розрахунковій довжині (рис. 2.54) тому, що ми мали справу лише з проекцією швидкості.

Коли всі розміри було витримано, а всі діаметри і довжини відповідали математичним умовам, було отримано повний збіг місць

розташування вузлів та пучностей з розрахунковими значеннями (рис. 2.55).

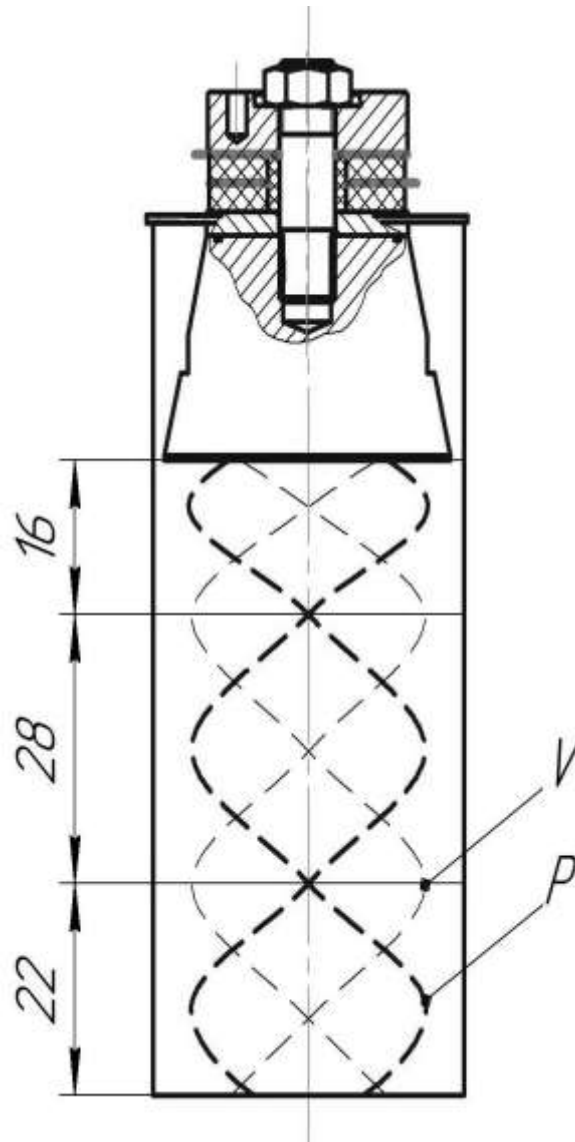
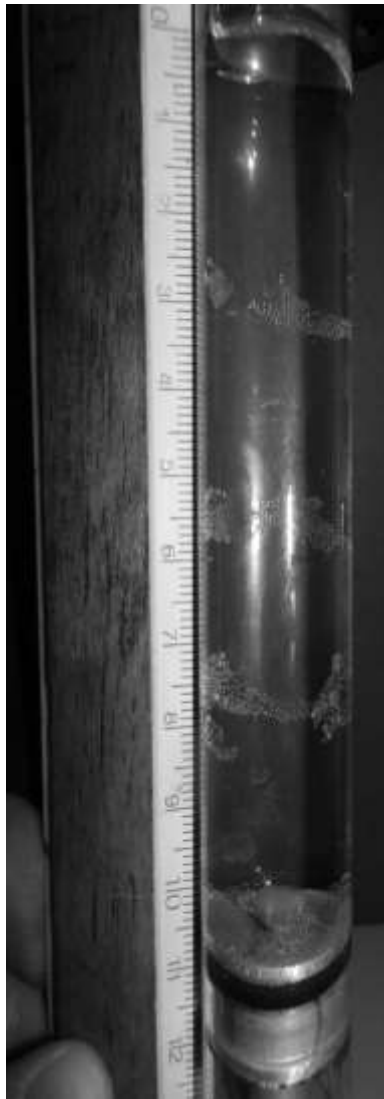


Рис. 2.54 – Експериментально виміряні довжини хвиль швидкості (V) і тиску (P) у бензині

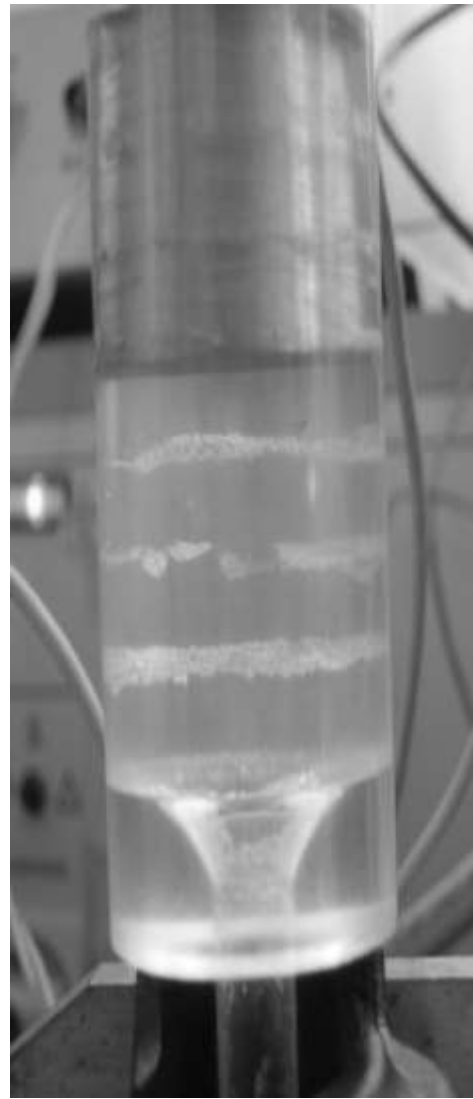
Було встановлено, що для чіткого встановлення хвилі, потрібно щоб було парне число четвертей хвилі по довжині кавітаційної камери. Також дослідили, що для відбиття хвилі на донній торцевій поверхні камери повинен бути мінімум швидкості звуку та максимум хвилі тиску.

Попередньо виміряна довжина хвилі води на частоті 35 КГц

становила $\lambda = 32$ мм.



а)



б)

Рис. 2.55 – Розташування кавітаційних прошарків в циліндричній камері (а) та гідравлічному трансформаторі (б)

Відстані від перетворювача, розміщеного у верхній частині циліндричної камери, до донної поверхні становлять:

$$\begin{aligned}L1 &= n \cdot \lambda = 4 \cdot 32 = 128 \quad \text{мм,} \\L2 &= n \cdot \lambda - \lambda / 4 = 4 \cdot 32 - 32 / 4 = 120 \quad \text{мм;} \\L3 &= n \cdot \lambda + \lambda / 4 = 4 \cdot 32 + 32 / 4 = 136 \quad \text{мм.}\end{aligned} \tag{2.73}$$

Кількість півхвиль $n = 4$.

Усереднені результати вимірювань відстаней від поверхні випромінювання до першого «0» та від останнього «0» до донної поверхні стакана наведені на рисунках 2.56 та 2.57. Наявність кавітації абсолютно не зміщує положення «0», лише робить їх менш вираженими, менш чіткими.

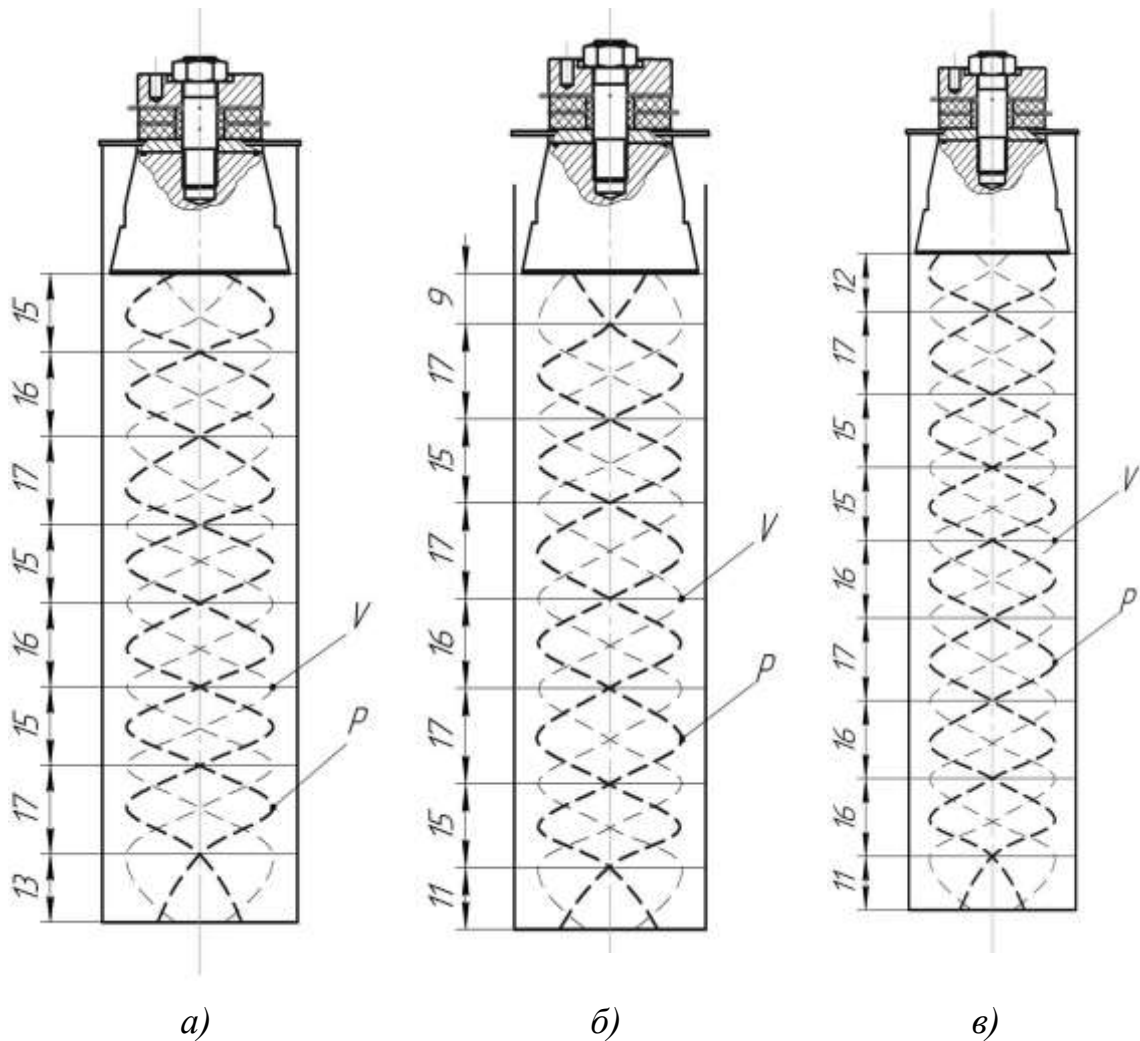


Рис. 2.56 – Експериментально виміряні довжини хвиль швидкості (V) і тиску (P) у воді для відстаней: а) $L_1 = n \cdot \lambda = 4 \cdot 32 = 128$ мм, б) $L_2 = n \cdot \lambda - \lambda / 4 = 4 \cdot 32 - 32 / 4 = 120$ мм, в) $L_3 = n \cdot \lambda + \lambda / 4 = 4 \cdot 32 + 32 / 4 = 136$ мм.

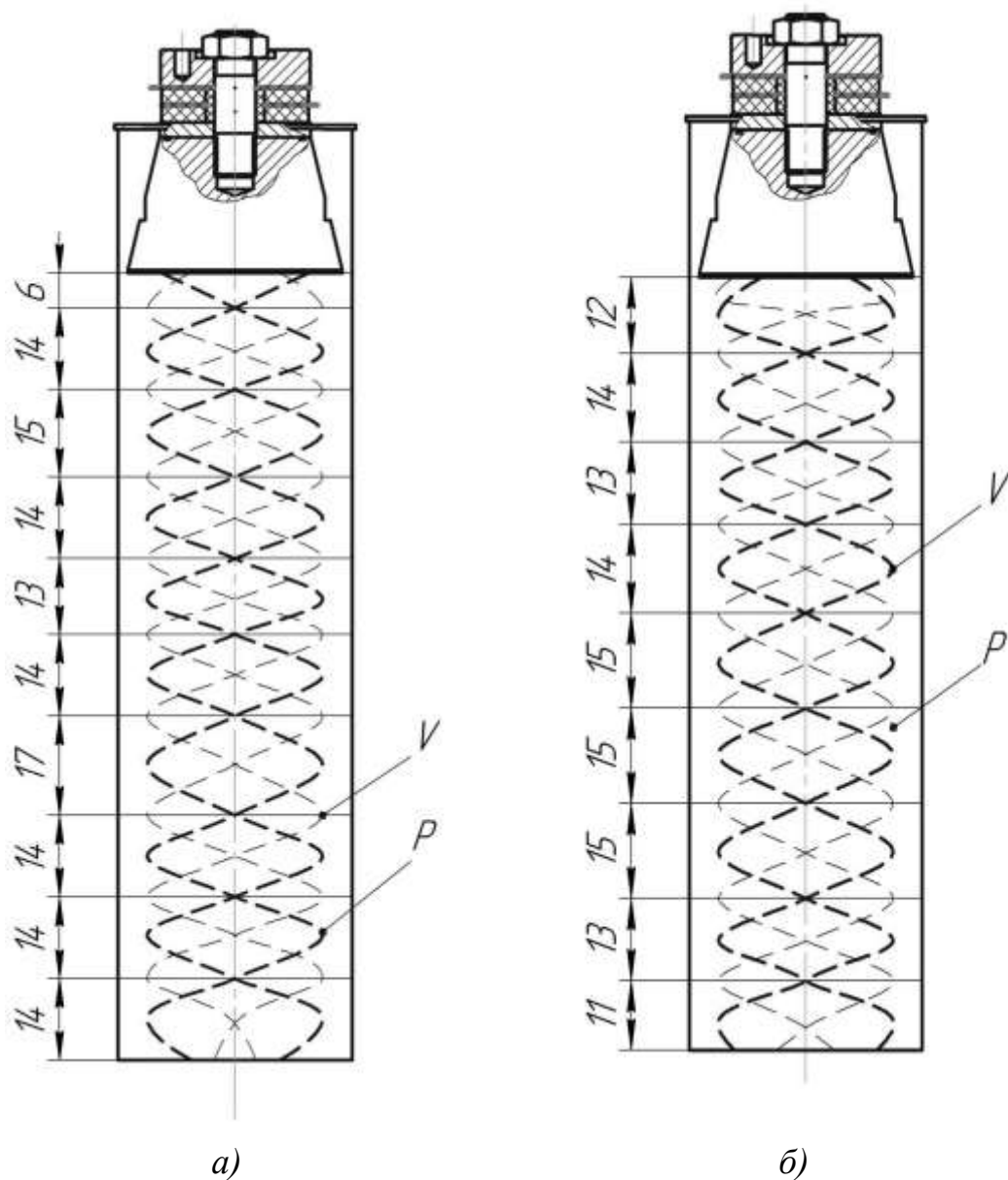


Рис. 2.57 – Експериментально виміряні довжини хвиль швидкості (V) і тиску (P) у бензині для відстаней: $L_1 = n \cdot \lambda = 4 \cdot 34 = 136$ мм, б)

$$L_2 = n \cdot \lambda - \lambda / 4 = 4 \cdot 34 - 34 / 4 = 127,5 \text{ мм}$$

На рисунку 2.58 показано на прикладі тестової алюмінієвої фольги результати експериментальної перевірки ерозійної активності в вузлах та в пучностях плоскої хвилі, що встановилася.

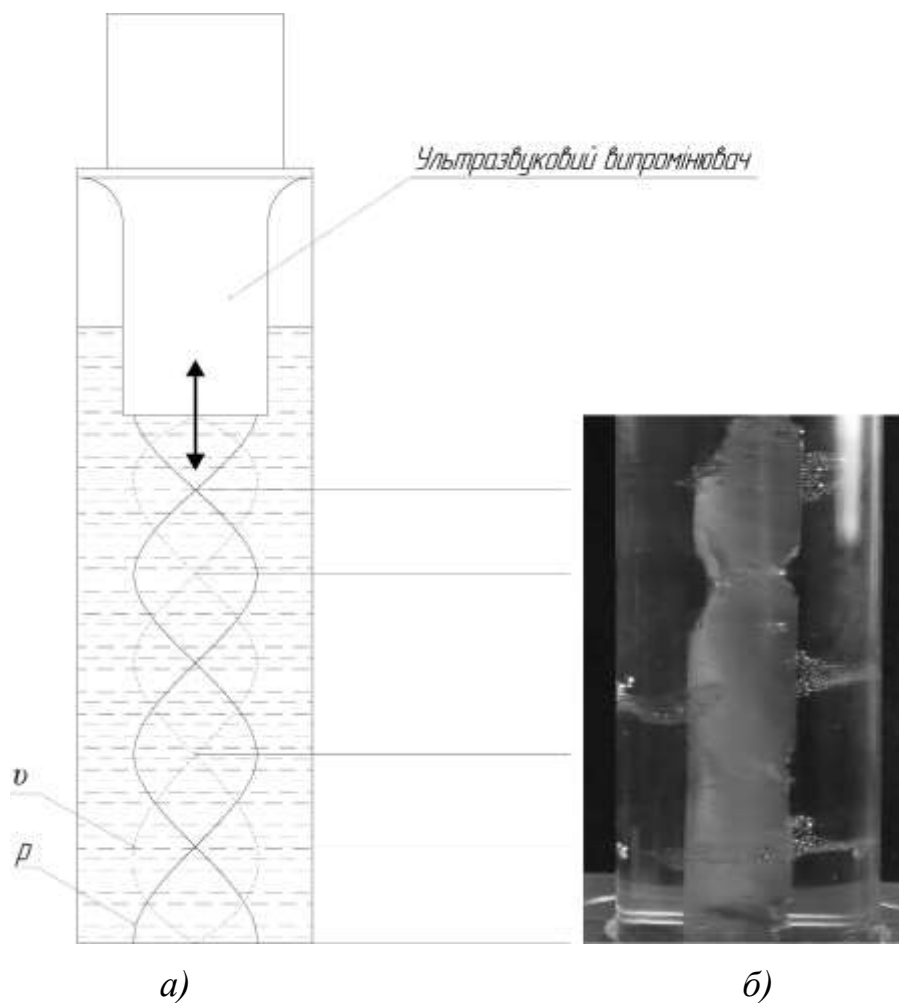


Рис. 2.58 – Схема розміщення ультразвукового поля плоскої стоячої хвилі (а) і фотографія кавітаційної ерозії тестової алюмінієвої фольги в місцях, відповідних пучностям тиску (б)

Фільтрувальну перегородку в ультразвуковому полі можна розташувати в двох місцях - в пучності або у вузлі. Для визначення оптимального положення було виготовлено стенд, представлений на рис. 2.59. Установка представляє собою скляну трубу, обмежену кришками з поліметилакрилату. На верхній кришці труби розміщено ультразвуковий випромінювач 2 потужністю 50 Вт. У скляній трубі розміщено фільтрувальну перегородку 4, яка виконана з поглинаючого пружні коливання матеріалу – фторопласту або з відбиваючого пружні коливання матеріалу – металеві сітки.

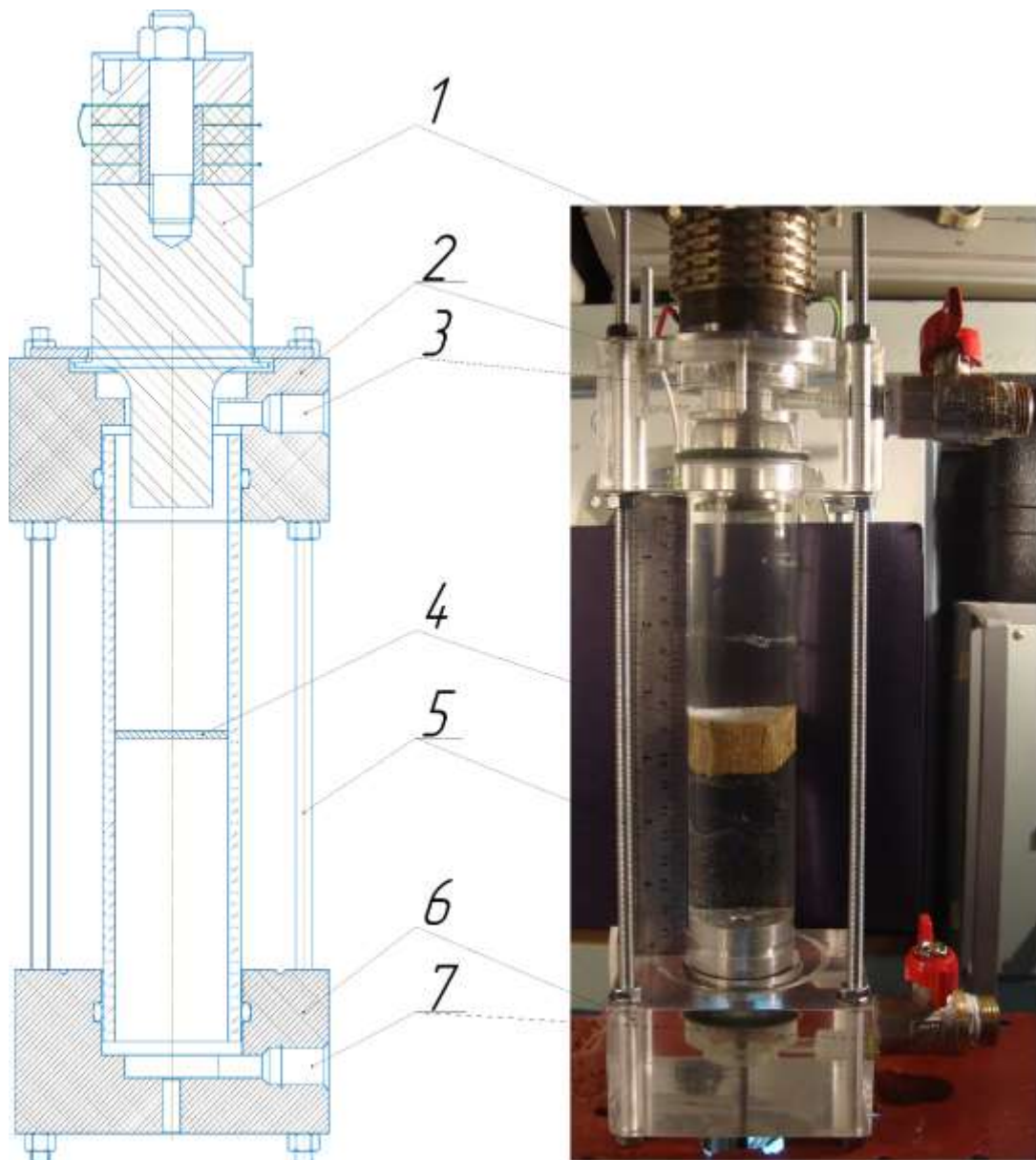


Рис. 2.59 – Схема стенда для визначення оптимального місцеположення фільтрувальної перегородки. (1 – ультразвуковий кавітаційний випромінювач; 2 – кришка верхня; 3 – відвід рідини; 4 – випробувана перегородка; 5 – шпилька кріплення; 6 – кришка нижня; 7 – підвід рідини)

Експериментальний стенд передбачає можливість розміщення фільтрувальної перегородки в вузлі або в пучності ультразвукових

коливань. Через штуцер 3 відбувається нагнітання рідини в установку, а через штуцер 7 її відвід. Дослідження проводились при атмосферному тиску. Для визначення інтенсивності ультразвукової кавітації в тестовому середовищі, в центрі скляної труби стенду розміщували тестову фольгу, за площею руйнування якої визначалася інтенсивність кавітаційної ерозії (рис. 2.58). Озвучування кавітаційного середовища виконувалося протягом 5 секунд.

В результаті було встановлено, що розташовувати фільтрувальну перегородку доцільно не далі ніж 1,5 довжини хвилі від поверхні випромінювання. При цьому спостерігалась максимальна ефективність кавітаційної ерозії тестової фольги (рис. 2.58). Фторопласт Ф4 має поглинаючу поверхню і на його поверхні у будь-якому випадку буде мінімум швидкості та максимум тиску, тобто вузол стоячої хвилі. Відлік вузлів та пучностей стоячої хвилі завжди починався з поверхні фторопластової перегородки.

ПІДСУМКИ

В монографії обґрунтована можливість підвищення ефективності технологічних процесів на базі ультразвукової кавітації шляхом створення кавітаторів, висока інтенсивність ультразвуку в яких забезпечується за рахунок фокусуєчих властивостей поверхні випромінювання.

Запропонована математична модель, яка описує процес виникнення і розвитку кавітаційних зон в технологічному об'ємі трубчастої кавітаційної камери, стінки якої здійснюють резонансні ультразвукові коливання радіальної моди. Модель дозволяє аналітично визначити розташування і інтенсивність кавітаційних областей, завдяки чому забезпечується висока ефективність і довговічність створюваного технологічного кавітаційного обладнання.

Чисельним моделюванням і експериментальним дослідженням підтверджена можливість підвищення інтенсивності кавітації у фокальній області трубчастого вібратора, збудженого на радіальній моді коливань. Досягнута при цьому у фокальній області вібратора інтенсивність ультразвукових коливань складає 20...120 Вт/см².

Експериментальні дослідження можливостей застосування ультразвукових кавітаторів з високою інтенсивністю ультразвуку в технологічному процесі інактивації мікроорганізмів показали, що основним в процесі інактивації є механізм механічного руйнування мікроорганізмів в кавітаційному середовищі. Це дозволило запропонувати новий спосіб 5...6 кратного підвищення технологічної продуктивності за рахунок додавання в кавітаційне середовище абразивного матеріалу з подальшим його видаленням при фільтрації.

За результатами комп'ютерного дослідження росту парогазової бульбашки в ультразвуковому середовищі отримано показники

швидкості руху частинки забруднювача, яка знаходиться біля стінки колапсуючої кавітаційної бульбашки. Отримані результати засвідчують можливість досягнення частинками забруднювача надзвукової швидкості переміщення в рідині.

Шляхом математичного моделювання ударної взаємодії частинки бруду з фільтрувальною перегородкою визначено залежності зношення у часі під впливом ультразвукової кавітації поверхонь з фторопласту Ф4 та сталі 12Х18Н10Т. Встановлено, що сталь 12Х18Н10Т вдвічі менше піддається впливу кавітаційної ерозії у порівнянні з фторопластом Ф4. За результатами експериментального дослідження впливу параметрів процесу ультразвукової кавітації на відносну втрату об'єму конструкційних матеріалів встановлено, що модуль Юнга матеріалу має суттєво більший вплив на відносну втрату об'єму конструкційних матеріалів, ніж тривалість кавітаційного впливу, тобто 12Х18Н10Т є доцільним матеріалом для використання в ультразвукових кавітаційних фільтрах.

В монографії за результатами експериментального дослідження встановлено залежність надлишкового та вакууметричного тиску в кавітаційній камері від інтенсивності ультразвукової кавітації та визначено, що максимальна інтенсивність кавітаційного впливу припадає на інтервал тиску 0,2...0,3 МПа. Експериментально визначено раціональні параметри розташування фільтрувальної перегородки відносно ультразвукової хвилі в кавітаційній камері.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Новицкий Б. Г. Применение акустических колебаний в Химико-технологических процессах / Б. Г. Новицкий – М.: Химия, 1983. –192 с. – (Процессы и аппараты химической и нефтяной технологии).

2. Пат. 54053 Україна, МПК (2009): B05B 17/00, A01G 9/24. Пристрій для ультразвукового розпилення рідини / О. Ф. Луговський, А. В. Мовчанюк. С. А. Кривко, І. А. Гришко.; заявник і патентовласник Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут». – № u201004902; заявл. 23.04.2010, опубл. 25.10.2010, Бюл. № 20.

3. Пат. 54054 Україна, МПК (2009): B05B 17/00, A01G 9/24. Пристрій для ультразвукового розпилення рідини / О. Ф. Луговський, А. В. Мовчанюк. С. А. Кривко, І. А. Гришко.; заявник і патентовласник Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут». – № u201004904; заявл. 23.04.2010, опубл. 25.10.2010, Бюл. № 20.

4. Пат. 96525 Україна, МПК (2011.01): B05B 17/00, F23D 11/34 (2006.01), F02M 27/08 (2006.01), C02F 1/34 (2006.01). Пристрій для обробки рідини / О. Ф. Луговський, А. В. Мовчанюк, І. А. Гришко, А. В. Ляшок.; заявник і патентовласник Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут». – № a201009466; заявл. 28.07.2010, опубл. 10.11.2011, Бюл. № 21.

5. Агранат Б. А. Ультразвуковая технология / [Б. А. Агранат, В. И Башкиров, Ю. И. Китайгородский, Н. Н. Хавский]; под ред. Б. А. Аграната – М.: Металлургия, 1974. – 503 с.

6. Луговской А. Ф. Применение пьезоэлектрических преобразователей как путь совершенствования систем подготовки и подачи топлива в ДВС / А. Ф. Луговской // Вестник Национального

технического университета Украины «КПИ». Машиностроение. – Киев, 1997. – Вып. 32. – С. 34 – 38.

7. Хавский Н. Н. Интенсификация процессов извлечения металлов из руд в ультразвуковом поле / [Н. Н. Хавский [и др.] – М.: Metallurgia, 1969. – С. 24 – 32.

8. Круглицкий Н. Н. Ультразвук в химической технологии / Н. Н. Круглицкий, В. Ю. Третинник, В. В. Симуров. – К.: УкрНИИНТИ, 1970. – 48 с.

9. Гершгал Д. А. Ультразвуковая технологическая аппаратура / Д. А. Гершгал, В. И. Фридман. [3-е изд. перераб. и доп.]. – М.: Энергия, 1976. – 320 с.

10. Новицкий Б. Г. Исследование совместного воздействия акустических колебаний с электрическими и центробежными полями / Б. Г. Новицкий, В. Д. Петрушкин, М. Н. Чижиков, В. М. Фридман // Труды 8-ой Всесоюзной акустической конференции. – М.: 1973. – С. 66 – 72.

11. Грачев И. С. Образование пузырька газа у вибрирующего капилляра, затопленного в жидкости / И. С. Грачев, Д. Т. Кокорев, В. Ф. Юдаев. // ИФЖ, 1976. – Т. 30, – №4. С. 665 – 670.

12. Полуянченко Е. К., Фридман В. М., Голованчиков А. Б. // Труды Волгоградского политехнического института. – 1972. – С. 17 – 25.

13. Луговський О. Ф. Застосування ультразвукових коливань у пристроях фільтрування рідини / О. Ф. Луговський, В. І. Чорний // Вестник Национального технического университета Украины «КПИ». Машиностроение. – Киев, 1999. – Вып. 35. – С. 111 – 119.

14. Гончарук В. В. Использование ультразвука при очистке воды / В. В. Гончарук, В. В. Маляренко, В. А. Яременко // Химия и технология воды, 2008. – Т. 30, – №3. С. 253 – 276.

15. Hua I., Hoffman M.R. // Environ. Sci. and Technol. – 1997. – 31,

N 8. – P.2237 – 2241.

16. Walton D.J., Phull S.S., Geissler U., Chyla A., Durham A., Ryley S., Mason T.J., Lorimer J.P. // *Electrochem. Commun.* – 2000. – 2 – P. 431 – 432.

17. Walton D.J., Geissler U., Chyla A., Mason T.J., Lorimer J.P. // *Proc. of World Congress on Ultrasonics (Berlin, 9 – 13 september, 1996).* – Berlin: Wissenschaft, 1996. – P. 19 – 20.

18. Касимов А. М. Управление промышленными отходами. В 2-х томах, т.2. Технологии обезвреживания и утилизации промышленных отходов. Учебное пособие / А. М. Касимов. – Х.: РИП «Оригинал», 2000. – 308 с.

19. Федоткин И. М. Интенсификация технологических процессов / И. М. Федоткин. – К.: Вища школа. Головне вид-во, 1979. – 344 с.

20. Падалка Е. С. Ультразвук в нефтяной промышленности / Е. С. Падалка. – К.: Гос. изд. техн. лит., 1962. – 67 с.

21. Луговской А. Ф. Опыт озвучивания ультразвуковыми колебаниями нефти и нефтепродуктов / А. Ф. Луговской, В. П. Киселев, С. И. Марусий. // *Вісник НТУУ «КПІ». Машинобудування.* – Київ, 2011. Вип. 62. – С. 36 – 40.

22. Будаева В. В. Исследование ферментативного гидролиза отходов переработки злаков / В. В. Будаева, Р. Ю. Митрофанов, В. Н. Золотухин. // *Ползуновский вестник.* – 2008. – №3. – С. 322 – 327.

23. Глущенко В. М. Акустическая технология бетонов / В. М. Глущенко. // *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури.* – Днепропетровск.: – ПГАСА, 2010. – № 23. – С. 38 – 42.

24. Келлер О. К. Ультразвуковая очистка / О. К. Келлер,

Г.С. Кратыш, Т. Д. Лубяницкий. – Л.: Машиностроение, 1977. – 184 с.

25. Гальперина А. Н. Пакетные пьезокерамические преобразователи / А. Н. Гальперина // Прогрессивные методы ультразвуковой очистки изделий в химическом и нефтяном машиностроении. – М.: 1967. – С. 25 – 28.

26. Яхно О. М. Исследование возможностей технологии ультразвуковой кавитационной очистки эластичных поверхностей / О. М. Яхно, Е. А. Луговская, А. В. Мовчанюк // Вестник Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт». Серия машиностроение. – Киев, 2010. – Вип. 58. – С. 234 – 240.

27. Луговской А. Ф. Экспериментальное исследование технологического процесса ультразвуковой кавитационной стирки / А. Ф. Луговской, Н. С. Шидловский, И. А. Гришко, С. О. Кравченко // Вестник Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт». Серия машиностроение. – Киев, 2009. – Вип. 55. – С. 324 – 331.

28. Луговской А. Ф. Экспериментальное исследование технологического процесса ультразвуковой кавитационной стирки / А. Ф. Луговской, Н. С. Шидловский, И. А. Гришко, С. О. Кравченко // Тези X міжнародної науково-технічної конференції «Прогресивна техніка та технологія – 2009». – Київ, Севастополь, 2009. – С. 48 – 49.

29. Луговской А. Ф. Оценка методов обеззараживания воды / А. Ф. Луговской, А. В. Мовчанюк, И. А. Гришко // Вестник Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт». Серия машиностроение. – Київ, 2008. – Вип. 52. – С. 103 – 111.

30. Кудряшов В. Л. Эффективность и проблемы применения

ультразвука в технологических линиях пищевой промышленности / В. Л. Кудряшов, Н. М. Сиверская, Н. М. Лебедев и др. // Труды науч. – практ. конф. «Технологические аспекты комплексной переработки сельскохозяйственного сырья при производстве экологически безопасных пищевых продуктов общего и специального назначения» (Углич, 11 – 14 сентября. 2002 г.) / Россельхозакадемия. – Углич, 2002. – С. 249 – 252.

31. Акопян В. Б. Основы взаимодействия ультразвука с биологическими объектами / В. Б. Акопян, Ю. А. Ершов. – М.: Из-во МВТУ им. Баумана, 2005. – 224 с.

32. Хмелев В. Н. Ультразвуковая сушка и предпосевная обработка семян / В. Н. Хмелев, А. Н. Лебедев, М. В. Хмелев // Conference Name International Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials EDM 2006. – Publisher НГТУ, 2006. – P. 71 – 84.

33. Голубев В. Н. Роторно–кавитационный аппарат для обработки пектинсодержащего сырья / В. Н. Голубев, С. Н. Губанов, О. Г. Микеладзе // Пищевая промышленность. – 1990. – № 9. – С. 30 – 32.

34. Берник І. М. Використання фізичних полів для гідролізу пропектину рослинної сировини / І. М. Берник, О. Ф. Луговской // Вібрації в техніці та технологіях. – Вінниця.: ВДАУ, 2008. – №3(52). – С. 92 – 100.

35. Рахманин Ю. А. Совместное применение активного хлора и коагулянтов для очистки и обеззараживания питьевой воды / Ю. А. Рахманин З. И. Жолдакова, Е. Е. Полякова, Л. Ф. Кирьянова, И. Н. Мясников, Е. А. Тульская, Т. З. Артемова, Л. В. Иванова, Р. А. Дмитриева, Т. В. Доскина. // Гигиена и санитария. – 2004. – №1. – С. 449 – 458.

36. Пасль Л. Л. Справочник по очистке природных и сточных

вод/ Л. Л. Пасль, Я. Я. Кару, Х. А. Мельдер, Б. Н. Репин. – М.: Медицина, 1994. – С.36 – 39.

37. Колесов А. М. Термический метод обеззараживания сточных вод / А. М. Колесов, Л. С. Глаголев. // Гигиена и санитария, 1978. – №3. – 104 с.

38. Сащенко В. В. Улучшение химико–биологических показателей питьевой воды методом программированного замораживания: дис. канд. техн. наук: 27.00.03 / Сащенко Валерий Викторович; ВУО МАНЭБ. – Алчевск., 2009. – 110 с.

39. Золотухина Е. В. Обеззараживание воды нанокompозитами на основе пористого оксида алюминия и соединений серебра / Е. В. Золотухина, Б. А. Спиридонов, В. И. Федянин и др. // Сорбционные и хроматографические процессы. – 2010. – Том 10, – № 1. – С. 78 – 85.

40. Шмутер Г. М. Гигиеническая оценка электрохимического метода обеззараживания воды серебром / Г. М. Шмутер, П. В. Изотова, А. Л. Масленко, А. А. Фурман, Т. Т. Соболевская. // Гигиена и санитария. – 1986. – №12 – С.10 – 11.

41. Костюченко С. В. Ультрафиолетовое облучение – современный метод обеззараживания воды / С. В. Костюченко. // Водоснабжение и санитарная техника. – 2005. – № 12, – Ч. 1. – С.21 – 23.

42. Слипченко А. В. Современное состояние методов окисления примесей воды и перспективы хлорирования / А. В. Слипченко, Л. А. Кульский, Е. С. Мацевич // Химия и технология воды. – 1990. – Т. 12, – №4. – С. 326 – 349.

43. Петренко Н. Ф. Диоксид хлора: применение в технологиях водоподготовки / Н. Ф. Петренко, А. В. Мокиенко. – Одесса: Optimum, 2005. – 486 с.

44. Савлук О. С. Интенсификация обеззараживания воды

гипохлоритом натрия в присутствии ионов меди или серебра / О. С. Савлук, И. П. Томашевская, В. Н. Косинова // Химия и технология воды. – 1990. – Т. 12, – № 1. – С. 74 – 78.

45. Прокопов В. А. Хлорорганічні сполуки у питній воді України: моніторинг, умови утворення та видалення, ризику для здоров'я/ В. А. Прокопов. // Актуальні питання гігієни та екологічної безпеки України. – 2006. – С. 38 – 41.

46. Бахир В. М. Дезинфекция питьевой воды: проблемы и решения / В. М. Бахир // Вода и экология. – 2003. – № 1. – С. 33–39.

47. Гончарук В. В. Биотехнология в подготовке питьевой воды / В. В. Гончарук, А. С. Гордиенко, Л. И. Глоба, П. И. Гвоздяк. // Химия и технология воды. – 2003. – №4. – С. 363 – 374.

48. Мокиенко А. В. Галогенсодержащие соединения (ГСС) как продукты хлорирования воды. Сообщение первое. Краткая история вопроса и общее состояние проблемы (часть 1) / А. В. Мокиенко, Н. Ф. Петренко, А. И. Гоженко / Актуальные проблемы транспортной медицины. – 2011. – № 4 (26). С. 36 – 49.

49. Hwang B. F., Jaakola J. J. // Arch. Environ. Health. – 2003. – №58. – P. 83 – 91.

50. Cantor K. T. // Cancer Causes Control. – 1997. – №8. – P. 292 – 308.

51. Жуков Н. Н. Озонирование воды в технологии водоподготовки / Н. Н. Жуков, В. Л. Драгинский, Л. П. Алексеева // Водоснабжение и санитарная техника. – 2000. – №1. – С. 2 – 4.

52. Singer P.C. Assessing ozonation research needs in water treatment / P. C. Singer, J. I Amer // Water Works Assos. –1990. – Vol.82, – №10. – P. 78 – 88.

53. Jyoti K. K. Ozone and cavitation for water disinfection /

К.К. Jyoti, A. V. Pandit // Biochemical Engineering Journal. – 2004. – №18. – P. 9 – 19.

54. Псахис Б.И. Озоновая обработка питьевой воды / Б. И. Псахис, И.Б. Псахис, А.М. Войтенко / Актуальные проблемы транспортной медицины. – 2007. – № 2 (8). С. 55 – 61.

55. Разумовський С. Д. Озон та його реакції з алифатичними сполуками / С. Д. Разумовський, Г. А. Галстян, М. Ф.Тюпало: Монографія. – Луганськ: видавництво СУДУ, 2000. – 318 с.

56. Галстян Г. А. Озон и его реакции с ароматическими соединениями в жидкой фазе / Г. А. Галстян, Н. Ф. Тюпало, С. Д. Разумовский.: Монография. – Луганск: издательство ВНУ им. В.Даля, 2004. – 272с.

57. Draginsky V. L., Alekseeva L. P. The role of ozonation in the light of new requirements for drinking water quality in Proceedings of the First All-Russia ference "Ozone and other environmentally friendly oxidants. Science and technology." – Moskva, 2005. – P. 57 –74.

58. Stumm W. Ozone as a disinfectant for water and sewage // Boston Soc. Eng. J.: 54, 1968. – С. 68 – 73.

59. Мищук Н. А. Теоретический анализ процессов, протекающих при озонировании воды, содержащей органические вещества / Н. А. Мищук, В. В. Гончарук, В. Ф. Вакуленко // Химия и технология воды. – 2003. – №1. – С. 3 – 29.

60. Гончарук В. В. Озонирование как метод подготовки питьевой воды: возможные побочные продукты и токсикологическая оценка / В. В. Гончарук, Н. Г. Потапченко, В. Ф. Вакуленко // Химия и технология воды. – 1995. – Т. 17, – № 1. – С. 3 – 33.

61. Терентьев В. И. Перспективы совершенствования технологии обеззараживания воды поверхностных источников /

В. И. Терентьев, В. К. Гриценко, С. А. Лопатин, Л. Ф. Кирьянова, К. К. Раевский, В. П. Фоканов, А. В. Шаларь // Гигиена и санитария. – 2002. – №3. – С. 29 – 36.

62. Авчинников А. В. О способах консервации питьевой воды на автономных объектах (обзор) / А. В. Авчинников, Ю. А. Рахманин, Е. Г. Жук, И. Н. Рыжова // Гигиена и санитария. – 1996. – №2. – С. 9 – 13.

63. Miyano N. Efficacy of disinfectants and hot water against biofilm cells of *Burkholderia ceracia* / N. Miyano, S. Oie, A. Kamiya // Biol. Pharm. Bull. – 2003. Vol. 26, – № 5. – P. 671 – 674.

64. Gottardi W. Iodine and disinfection: theoretical study on mode of action, efficiency, stability, and analytical aspects in the aqueous system / Gottardi W. // Arch Pharm (Weinheim). – 1999. – May; 332(5):151 – 7.

65. Y. Bichsel Hypoiodous acid: Kinetics of the buffer-catalyzed disproportionation / Y. Bichsel, U. von Gunten, Water research. – 2000. – Vol. 34, №12 – P. 3197–3203.

66. Часова Э. В. Диоксины как экологическая опасность / Э. В. Часова, Л. Д. Ермак, В. В. Ивчук, Л. П. Луценко // Вісник КТУ. – 2010. – Вип. 25. С. 12 – 14.

67. Гончарук В. В. Новая концепция обеспечения населения качественной питьевой водой / В. В. Гончарук // Химия и технология воды. – 2008. – Т. 30, – №6. – С. 239 – 252.

68. Савлук О. С. Обеззараживание питьевой воды / О. С. Савлук, Н. Г. Потапченко, В. Н. Косинова // Химия и технология воды. – 1998. – Т. 20, №1. – С. 99 – 111.

69. Веселов Ю.С. Водоочистное оборудование: конструирование и использование / Ю.С. Веселов, И.С. Лавров, Н.И. Рукобратский – Л.: Медицина, 1985. – С. 34 – 42.

70. Лаврик Н. Л. Возможность очистки воды от растворимых

примесей CaCO₃ с помощью метода перекристаллизации при –17 С / Н. Л. Лаврик, Г. Г. Дульцева // Химия в интересах устойчивого развития. – 2003. – №11. – С. 863 – 867.

71. Кульский Л. А. Серебряная вода (электрокатадиновое серебро и его применение в водоснабжении, пищевой промышленности и в медицине) / Л. А. Кульский. – Киев.: Гостехиздат УССР, 1946. – 262 с.

72. Мартынов А. В. Фонтаны Украины открытые очаги инфекционных заболеваний: причины, анализ ситуации, решение проблемы / А. В. Мартынов, М. Б. Мануйлов, И. И. Степанова, В. В. Маньковский, В. М. Московкин // Annals of Mechnikov Institute, – 2011. – N 2. С.30 – 38.

73. Кульский Л. А. Теоретические основы и технология кондиционирования воды / Л. А. Кульский – К.: Наукова думка, 1982. – 564 с. – (издание четвертое переработанное и дополненное).

74. Токарев В. И. Технология обеззараживания питьевой воды препаратами серебра: дисс. канд. техн. наук. 11.00.11. / Токарев Владимир Иванович; Новочеркасск, 1997. – 246 с.

75. Потапченко Н. Г. Сочетанное действие УФ-излучения ($\lambda = 254$ нм) и ионов меди и серебра на выживаемость E.coli / Н. Г. Потапченко, О. С. Савлук, В. В. Иллященко // Химия и технология воды. – 1992. – Т. 14, – № 12. – С. 935 – 939.

76. Рішко О. А. Клінічний випадок рідкісного захворювання на аргірію / О. А. Рішко, М. М. Шютєв, І. І. Поляк-Митровка, В. Т. Блецкан, Л. К. Смагіна, Б. Л. Светелскі // Науковий вісник Ужгородського університету. Серія «Медицина». – 2012. – Випуск 1 (43).– С. 63 – 66.

77. Fung M. Silver products for medical indications: risk – benefit assessment / M. Fung, D. Bowen// Journal of Toxicology and Clinical

Toxicology. – 1996. – Vol. 34. – P. 119 – 121.

78. Савлук О.С. Антимикробные свойства меди / О.С. Савлук, Л.П. Бухарская, И.П. Томашевская // Химия и технология воды. – 1986. – №6. – С. 65 – 67.

79. Потапченко Н.Г. Обеззараживание воды при совместном использовании пероксида водорода и ионов серебра / Н.Г. Потапченко, В.Н. Косинова, В.В. Илляшенко [и др.] // Химия и технология воды. – 1995. – Т. 17, – № 3. – С. 311 – 316.

80. Зоммер Р. УФ обеззараживание питьевой воды: требования и стандарты / Р. Зоммер, Т. Хайдер, А. Кабай, Дж. Хиршман // Водоснабжение и санитарная техника. – 2005. – № 12, – Ч. 1. – С. 33 – 36.

81. Скурлатов Ю. И. Ультрафиолетовое излучение в процессах водоподготовки и водоочистки / Ю. И. Скурлатов, Е. В. Штамм // Водоснабжение и санитарная техника. – 1997. – № 9. – С. 14 – 18.

82. Алексеева Л. П. Озонирование в технологии очистки природных вод / Л. П. Алексеева, В. Л. Драгинский // Водоснабжение и санитарная техника. – 2007. – № 4. – С. 2 – 30.

83. ЗАО "СВАРОГ": [сайт]. URL: <http://www.svarog-uv.ru> (дата обращения: 21.01.2012).

84. Котельницкая А. И. Анализ методов обеззараживания жидких сред / А. И. Котельницкая, И. А. Гришко // Тези доповідей загально університетської науково-технічної конференції молодих вчених та студентів, присвяченої дню Науки. Секція «Машинобудування». Підсекція «Прикладна гідроаеромеханіка і механотроніка» – Київ, 2011. – С. 9 – 11.

85. Гришко И. А. Бактерицидное действие ультразвуковой кавитации / И. А. Гришко, М. Ф. Омелич, А. Ф. Луговской // Тези доповідей загально університетської науково-технічної конференції

молодих вчених та студентів, присвяченої дню Науки. Секція «Машинобудування». – Київ, 2008. – С. 58 – 62.

86. Котельницькая А. И. Анализ целесообразности применения ультразвуковой кавитации в процессе обеззараживания жидких сред / А. И. Котельницькая, И. А. Гришко // Тези доповідей загальноуніверситетської науково-технічної конференції молодих вчених та студентів, присвяченої дню Науки. Секція «Машинобудування». Підсекція «Прикладна гідроаеромеханіка і механотроніка» – Київ, 2012. – С. 17 – 18.

87. Эльпинер И. Е. Ультразвук. Физико–химическое и биологическое действие / И. Е. Эльпинер. – М.: Физматиз, 1963. – 430 с.

88. Луговской А. Ф. Проблемы создания технологического оборудования для ультразвукового кавитационного обеззараживания воды / А. Ф. Луговской, И. А. Гришко // Промислова гідравліка і пневматика. – Вінниця, 2009. – № 4 (26). – С. 3 – 6.

89. Луговской А. Ф. Ультразвуковая кавитация в современных технологиях / А. Ф. Луговской, Н. В. Чухраев. – К.: Видавничо–поліграфічний центр «Київський університет», 2007. – 244 с.

90. Пат. 81605 Україна, МПК (2006): C02F 1/36 (2006.01), A61L 2/02, C02F 1/48. Пристрій для обробки рідини в потоці / В. І. Чорний, О. Ф. Луговський, А. В. Мовчанюк.; заявник і патентовласник Чорний В.І., Луговський О.Ф., Мовчанюк А.В. – № 2004010079; заявл. 08.01.2004, опубл. 25.01.2008, Бюл. № 2.

91. Пат. 55279 Україна, МПК: C02F 1/36, C02F 1/48, A61L 2/02. Пристрій для ультразвукової обробки рідини в потоці / О. Ф. Луговський, В. І. Чорний, А. В. Мовчанюк.; заявник і патентовласник Луговський О. Ф., Чорний В. І., Мовчанюк А. В. – № 2002107879; заявл. 03.10.2002, опубл. 17.03.2003, Бюл. № 3.

92. Ультразвук. Маленькая энциклопедия / Глав. ред. И.П. Голямина. – М.: Советская энциклопедия, 1979. – 400 с.
93. Берник І. М Ультразвукові кавітаційні апарати для реалізації екологічно безпечної технології вилучення пектину з вторинної рослинної сировини / І. М. Берник, А. Ф. Луговской // Вісник НТУУ «КПІ». Машинобудування. – Київ, 2010. – Вип. 58. – С. 82 – 86.
94. Луговская Е. А. Методика расчета ультразвукового резонансного кавитатора с развитой поверхностью излучения / Е. А. Луговская // Вест. Нац. техн. ун-та Украины «Киев. политехн. ин-т». Серия «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження». – 2009. – № 2(4). – С. 13 – 19.
95. Мовчанюк А. В. Особенности расчета ультразвуковых кавитаторов с развитой поверхностью излучения различного технологического назначения / А. В. Мовчанюк, Е. А. Луговская, В. П. Фесич // Промислова гідравліка і пневматика. – Вінниця, 2011. – № 2 (32). С. 48 – 50.
96. Хмелев В. Н. Многофункциональные ультразвуковые аппараты и их применение в условиях малых производств, сельском и домашнем хозяйстве / В. Н. Хмелев, О. В. Попова. – Барнаул.: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 1997. – 173с.
97. Хмелев В. Н. Ультразвуковые многофункциональные и специализированные аппараты для интенсификации технологических процессов в промышленности, сельском и домашнем хозяйстве / В. Н. Хмелев, Г. В. Леонов, Р. В. Барсуков, С. Н. Цыганок, А. В. Шалунов. – Бийск.: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та БТИ, 2007. – 400 с.
98. Пат. 92987 Україна, МПК (2009): C02F 1/36 (2006.01), C02F 1/48, B01D 19/00, A61L 2/02. Пристрій для кавітаційної обробки рідини / О. Ф. Луговський, И. А. Гришко, А. В. Мовчанюк.; заявник і

патентовласник Луговський О. Ф., Гришко І. А., Мовчанюк А. В. – № а200909283; заявл. 09.09.2009, опубл. 27.12.2010, Бюл. № 24

99. Пат. 67944 Україна, МПК (2012.01): F04B 31/00, C02F

1/00. Пристрій для кавітаційної обробки рідини / І. А. Гришко, О. Ф. Луговський, А. В. Мовчанюк, М. Ф. Омелич.; заявник і патентовласник Гришко І. А., Луговський О. Ф., Мовчанюк А. В., Омелич М. Ф. – № u201109811; заявл. 08.08.2011, опубл. 12.03.2012, Бюл. № 5

100. Пат. 74148 Україна, МПК (2006): C02F 1/36 (2006.01), A61L 2/02, C02F 1/48. Пристрій для ультразвукового кавітаційного знезараження рідини / І. А. Гришко, О. Ф. Луговський, А. В. Мовчанюк, А. І. Котельницька.; заявник і патентовласник Гришко І. А., Луговський О. Ф., Мовчанюк А. В., Котельницька А. І. – № u201201143; заявл. 08.08.2011, опубл. 25.10.2012, Бюл. № 20.

101. Пат. 74120 Україна, МПК (2006): C02F 1/36 (2006.01), A61L 2/02, C02F 1/48. Спосіб ультразвукового кавітаційного знезараження рідини / І. А. Гришко, О. Ф. Луговський, А. В. Мовчанюк, А. І. Котельницька.; – № u201109809; заявл. 08.08.2011, опубл. 25.10.2012, Бюл. № 20.

102. Мовчанюк А. В. Особенности возникновения кавитации в технологическом объеме ультразвукового трубчатого кавитатора с радиальной модой колебаний / А. В. Мовчанюк, А. Ф. Луговской, И. А. Гришко // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Гірничо– електромеханічна. – Донецьк, 2010. – Вип. 20(176). – С. 75 – 84.

103. Кошляков Н. С. Уравнения в частных производных математической физики / Н. С. Кошляков, Э. Б. Глинер, М. М. Смирнов. – М.: Высшая школа, 1970. – 710 с.

104. Смирнов В. И. Курс высшей математики.– М.: Наука, 1974. – 655 с.
105. Трофимов В. А. Рабочие жидкости систем гидропривода / В. А.Трофимов, О. М.Яхно, А. П. Губарев, Р. И.Солонин.– К.: НТУУ «КПИ», 2009. – 184 с.
106. Солонин Р. И. Влияние реологических свойств рабочей жидкости на эффективность работы авиационных гидроприводов / Р.И. Солонин, А. П. Губарев // Вестник Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт». Серия машиностроение. – Київ, 2009. – Вип. 55, – С. 282 – 288.
107. Гришко И. А. Аналитическое исследование работы ультразвукового трубчатого кавитатора с радиальной формой колебаний/ И. А. Гришко // Вібрації в техніці та технологіях. – Вінниця, 2012. – №2(66). – С. 26 – 34.
108. Панов А. П. Ультразвуковая очистка прецизионных деталей / А. П. Панов. – М.: Машиностроение, 1984. – 88 с.
109. Агранат Б. А. Ультразвуковая очистка. В кн.: Физика и техника мощного ультразвука, том.Ш. Физические основы ультразвуковой технологи / Б. А. Агранат, В. И. Башкиров, Ю.И.Китайгородский.; под ред. Л. Д. Розенберга. – М.: Наука, 1970. – С. 165 – 253.
110. Гришко И. А. Проблемы ультразвукового кавитационного обеззараживания технологических сред / И. А. Гришко, А. Ф. Луговской // Матеріали XIII Міжнародної наукової конференції "сучасні проблеми землеробської механіки". – Вінниця, 2012. – С. 84 – 85.
111. Новосад А. А. Особливості застосування ультразвукових резонансних п'єзоелектричних приводів-випромінювачів в системах мехатроніки / А. А. Новосад // Вісник НТУУ "КПІ" Серія – Радіотехніка.

Радіоапаратобудування. – Київ, 2012 – Вип. 49. – С. 231.

112. Луговской А. Ф. Исследование работы ультразвукового трубчатого кавитатора в режиме радиальных колебаний / А. Ф. Луговской, А. В. Мовчанюк, И. А. Гришко // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія машинобудування. – Київ, 2010. – Вип. 59. – С. 285 – 287.

113. Мовчанюк А. В. Повышение эффективности ультразвуковой кавитационной очистки в ваннах малого объема / А. В. Мовчанюк, В. И. Чорний, М. Ф. Омелич // Промислова гідравліка і пневматика. – Вінниця, 2007. – № 1 (15). – С. 40 – 43.

114. Луговской А. Ф. Исследование работы ультразвукового трубчатого кавитатора в режиме радиальных колебаний / А. Ф. Луговской, И. А. Гришко, А. В. Мовчанюк // Тези доповідей XI Міжнародної науково-технічної конференції «Прогресивна техніка та технологія – 2010». – Київ, 2010. – С. 77.

115. Новосад А. А. Методи вимірювання інтенсивності кавітаційних процесів / А. А. Новосад // Матеріали III н/т конференції «Радіоелектроніка у XXI столітті». – Київ, 2009. – С. 12 -14.

116. Новосад А. А. Дослідження можливості вимірювання інтенсивності кавітації методом аналізу спектру акустичного сигналу / А. А. Новосад, О. Ф. Луговський, А. В. Мовчанюк, В. П. Фесіч // Промислова гідравліка і пневматика.- Київ, 2010. № 2 (28). С. 33-35.

117. Розенберг Л. Д. Кавитационная область // Мощные ультразвуковые поля / Под ред. Л. Д. Розенберга. – М.: Наука, 1968. – Ч. 6. – с. 221 – 266.

118. Новосад А. А. Особливості застосування сенсорів в мехатронних системах з керованою кавітацією. / А. А. Новосад // XVII Міжнародна науково-технічна конференція "Гідроаеромеханіка в

інженерній практиці" Тези доповідей. Черкаси. – 2012. С 14.

119. Новосад А. А. Порівняльний аналіз гідрофонів для вимірювання інтенсивності кавітації акустичним методом / А. А. Новосад, А. В. Мовчанюк, М. Ф. Омелич // Вісник НТУУ "КПІ". Серія Машинобудування. – Київ. 2010. – Вип. 59. – С. 245 – 249.

120. Гришко И. А. Ультразвуковая проточная кавитационная установка для повышения эффективности технологических процессов / И. А. Гришко, А. Ф. Луговской, В. С. Кривошеев // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія машинобудування. – Київ, 2011. – Вип. 63. – С. 230 – 232.

121. Бочаров В. П. Гідравліка гідропневмопристрої авіаційної техніки. – Навчальний посібник / В. П. Бочаров, М. М. Глазнов, Г. Й. Зайончковський, Т. В. Тарасенко, В. А. Трофімов. –К: 2011. – 472 с.

122. Гришко И. А. Ультразвуковая проточная кавитационная установка для повышения эффективности технологических процессов / И. А. Гришко, А. Ф. Луговской, В. С. Кривошеев // Тези доповідей XII Міжнародної науково- технічної конференції «Прогресивна техніка та технологія – 2011». – Київ, Севастополь, 2011. – С. 62.

123. Гришко И. А. Экспериментальное исследование рабочей области кавитационной проточной камеры / И. А. Гришко, А. Ф. Луговской // Матеріали конференції XIII Міжнародної науково-технічної конференції АС ПГП «Промислова гідравліка і пневматика». – Чернігів, 2012. – С. 27.

124. Бондаренко В. М. Общий анализ представлений о патогенных и условно-патогенных бактериях / В. М. Бондаренко // Журн.микробиол., 1997. – № 4. – С. 20 – 26.

125. Кочемасова З. Н. Санитарная микробиология и вирусология / З. Н. Кочемасова, С. А. Ефремова, А. М. Рыбакова. – М.: Медицина, 1987.

– 352 с.

126. Сообщество студентов Кировской ГМА: [Электронный ресурс]. URL: <http://vmede.org/index.php?topic=336.0> (дата обращения: 14.03.2012).

127. Воробьёв А. В. Медицинская и санитарная микробиология: учеб. пособие для студ. высш. мед. учеб. заведений / А. В. Воробьёв, Ю. С. Кривошеин, В. П. Ширококов. – 3-е изд., стер. – М.: Издательский центр «Академия», 2008. – 464 с.

128. Microbial Biorealm A Microbial Diversity Resource: [Электронный ресурс]. URL: <http://microbewiki.kenyon.edu> (дата обращения: 14.03.2012).

129. Марчук Л. В. Инактивация микроорганизмов в ультразвуковом поле высокой интенсивности / Л. В. Марчук, Г. В. Прокопенко, А. Ф. Луговской, И. А. Гришко // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Гірничо–електромеханічна. – Донецьк, 2010. – Вип. 22(195). – С. 195 – 206.

130. Гришко И. А. Возможности применения ультразвуковых колебаний в технологическом процессе инактивации микроорганизмов / И. А. Гришко, А. Ф. Луговской // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи (теорія, практика, історія, освіта)». – Київ, 2012. – С. 157 – 158.

131. Хлистун А. И. Функциональный анализ цифрового регулятора параметров воздуха, отбираемого от компрессора ГТД / А. И. Хлистун, В. П. Бочаров, А. З. Ганиев, Т. А. Терещенко // Авиационно-космическая техника и технология. – Харьков, 2011. – №8 (85). – С. 168–176.

132. Марчук Л. В. Повышение эффективности процесса ультразвуковой кавитации при инактивации микроорганизмов /

Л. В. Марчук, Г. В. Прокопенко, А. Ф. Луговской, И. А. Гришко // Вібрації в техніці та технологіях.– Вінниця, 2011. – № 3 (63). – С. 108–113.

133. Кондратьева И.И. Влияние смазочно–охлаждающих жидкостей на организм работающих подростков / И. И. Кондратьева, Л. Г. Центерова, М. С. Юрков // Гигиена и санитария. 1972. – №8. – С. 40.

134. ООО «Тотал Флюид Менеджмент» [сайт]. URL: http://tfm.prom.ua/about_us (дата обращения: 20.04.2012).

135. Максаев А. К. Антимикробные присадки для водосмешиваемых СОЖ и эффективность их применения / А. К. Максаев, Л. П. Морозова, Е. В. Лебедев и др. // Нефтепереработка и нефтехимия.– 1988. – Вып. 34.– С. 29 – 34.

136. Поруцкий Г. В. Антимикробные присадки к СОЖ / Г. В. Поруцкий, Т. А. Алпатьева, Г. П. Григорьева // Станки и инструменты. 1974. – № 2. – С. 34 – 39.

137. Качан, В. И. Бактериальное разрушение СОЖ и методы его предотвращения / В. И. Качан // Микробиологический журнал. –1981. Т.41. – С. 54 – 59.

138. Луговской А. Ф. Возможность применения ультразвуковой кавитации для продления срока службы смазывающе-охлаждающей жидкости / А. Ф. Луговской, И. А. Гришко // Тезисы докладов XII Международная научно-техническая конференция «Прогрессивная техника и технология – 2012». – Київ, Севастополь, 2012. – Часть 2. – С. 61.

139. Гришко И. А. Возможность применения ультразвуковой кавитации для обеззараживания технологических сред на примере смазывающе-охлаждающей жидкости / И. А. Гришко, Луговской А. Ф. // Промислова гідравліка і пневматика. – Вінниця, 2012. – № 3 (37).–

С. 25 – 28.

140. Светлова О. Р. Разработка комплексных методов очистки жидких сред от твёрдой фазы в технологии получения продуктов переработки целлюлозы / О. Р. Светлова // Автореферат по специальности 05.17.08 – Процессы и аппараты химических технологий. – Бийск, 2007. – 24 с.

141. Орлов Д. С Экология и охрана биосферы при химическом загрязнении / Д. С. Орлов, Л. К. Садовникова, И. Н. Лозановская // Учебное пособие для хим., хим-технол. и биол. спец. вузов/. – М.: Высш. шк., 2002. – 334 с.

142. Морозова Г. И. Глобальная экологическая проблема. / Г.И. Морозов, Р. А. Новиков; АН СССР, Ин-т мировой экономики и междунар. отношений. – М.: Мысль, 1988. – 204 с.

143. Brandt M. J. Water Filtration / M. J. Brandt, K. M. Johnson, A. J. Elphinston, and D. D. Ratnayaka // in Twort's Water Supply – 2017.

144. Проскуряков В. А Очистка сточных вод в химической промышленности / В. А. Проскуряков, Л. И. Шмидт // Ленинград: Химия, 1977. – 464 с.

145. Малиновская Т. А. Разделение суспензий в химической промышленности / Т. А. Малиновская, И. А. Кобринский, О. С Кирсанов., В. В Рейнфарт // М.: Химия, 1983. – 264 с.

146. Мельникова В. С. Очистка сточных вод полистирола методом напорной флотации / В. С. Мельникова, В. Г. Калюжнов, Л. К. Дегтярева, и В. А. Микишев // Пластические массы, № 5 – 1996. – С. 41–43.

147. Устинова Т. П. Об эффективности локальных установок очистки производственных сточных вод / Т. П. Устинова, Е. И. Титаренко// Хим. промышленность, № 2 – 2001. – С. 20–25.

148. Жужиков В. А. Фильтрование. Теория и практика разделения суспензий / В. А. Жужиков // Москва: Химия, 1980. – 400с.
149. Mullett M. Nanofiltration of mine water: Impact of feed pH and membrane charge on resource recovery and water discharge / M. Mullett, R. Fornarelli, and D. Ralph // Membranes (Basel) 4(2). – 2014. – pp.163-180.
150. Соколов В. И. Центрифугирование / В. И. Соколов // Москва: Химия, 1976. – 407с.
151. Verma S. Pretreatment of petrochemical wastewater by coagulation and flocculation and the sludge characteristics / S. Verma, B. Prasad, and I. M. Mishra // J. Hazard. Mater., 2010. – 178(1-3):1055-64.
152. Н. Heinz Anwendung von flockungsmitteln bei der abwasserreinigung / Н. Heinz // Seifen-Öle-Fette-Wache, vol. 144, no. 11–12, 1988. – pp. 447–455.
153. Rubio J. Overview of flotation as a wastewater treatment technique / J. Rubio, M. L. Souza, and R. W. Smith // Miner. Eng., 2002. – pp. 139-155.
154. Коваленко В. А. Основы техники очистки жидкостей от механических загрязнений / В. А. Коваленко и А. А. Ильинский // Москва: Химия, 1982. – 270с.
155. Bailes P. J. Electrostatic and centrifugal separation of liquid dispersions / P. J. Bailes and M. Watson // 9021756.3 (GB), 1992.
156. Gupta V. K. Chemical treatment technologies for waste-water recycling / V. K. Gupta, I. Ali, T. A. Saleh, A. Nayak, and S. Agarwal // An overview,” RSC Advances. 2012. – PP. 6380-6388
157. Smith R. Chemical Process Design and Integration / R. Smith // John Wiley and Sons, ltd, 2005. – 713 p.
158. Sahu O. Review on Chemical treatment of Industrial Waste Water / O. Sahu and P. Chaudhari // J. Appl. Sci. Environ. Manag., 2013.

159. Chen, J. P. Gravity Filtration / J. P. Chen, S.-Y. Chang, J. Y. C. Huang, E. R. Bauman, and Y.-T. Hung // *Physicochemical Treatment Processes*, 2005. – pp 501–543.
160. Todaro C. M. Centrifugation / C. M. Todaro // *Fermentation and Biochemical Engineering Handbook: Principles, Process Design, and Equipment: Third Edition*, 2014.
161. Cambiella A. Centrifugal separation efficiency in the treatment of waste emulsified oils / A. Cambiella, J. M. Benito, C. Pazos, and J. Coca // *Chem. Eng. Res. Des.*, 2006. – pp.69–76.
162. H. Anlauf, “Recent developments in centrifuge technology / H. Anlauf // *Sep. Purif. Technol.*, 2007. Volume 58, Issue 2, 2007. – pp. 242-246.
163. Bhave R. R. Cross-Flow Filtration / R. R. Bhave // *Fermentation and Biochemical Engineering Handbook: Principles, Process Design, and Equipment: Third Edition*, 2014.
164. Gray N. F. Filtration Methods / N. F. Gray // *Microbiology of Waterborne Diseases: Microbiological Aspects and Risks: Second Edition*, 2013.
165. Š. Schlosser Membrane filtration / Š. Schlosser // *Engineering Aspects of Food Biotechnology*, 2013.
166. Johnston P. R. Liquid filtration / P. R. Johnston // *Chem. Eng. Prog.*, 1988.
167. Берестюк Г. И., Регенерация фильтров для разделения суспензий / Г. И. Берестюк // Москва: Химия, 1978. — 96 с.
168. Дмитриева, И. А. Физико-механические испытания химических волокон. / И. А. Дмитриева, Л. О. Михайловская. – М.: Высшая школа, 1970. – 102 с.
169. Рафиенко И. А., Фильтрование рудных пульп на синтетических фильтротканях / И. А. Рафиенко // М.: Недра, 1967. – 183с.

170. Скобеев И. К. Фильтрующие материалы / И. К. Скобеев // Недра, Москва, 1978. – 200 с.
171. Savage N. Nanomaterials and water purification: Opportunities and challenges / N. Savage and M. S. Diallo // Journal of Nanoparticle Research volume 7, 2005. pp. 331–342.
172. Малиновская Т. А. Разделение суспензий в промышленности органического синтеза / Т. А. Малиновская // М. : Химия, 1971. – 318 с.
173. Нигматулин Р. И. Динамика многофазных сред. Часть 1. / Р. И. Нигматулин // М: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. – 464 с.
174. Г. Уоллис Одномерные двухфазные течения / Г. Уоллис // М.: Мир, 1972. – 436 с.
175. Соу С. Гидродинамика многофазных систем / С. Соу // М.: Мир, 1971. – 536 с.
176. Ентов В. М. Теория фильтрации / В. М. Ентов // Соросовский образовательный журнал, № 2, 1998. – С. 121–128.
177. Френкель Я. И. Кинетическая теория жидкостей / Я. И. Френкель // Ленинград: Наука, 1975. – 592 с.
178. Лейбензон Л. С. Движение природных жидкостей и газов в пористой среде / Л. С. Лейбензон // Москва: ОГИЗ. Гос. изд-во технико-теорет. лит., 1947. – 244 с.
179. Al-Amoudi A. Fouling strategies and the cleaning system of NF membranes and factors affecting cleaning efficiency / A. Al-Amoudi and R. W. Lovitt // J. Memb. Sci., 2007. – pp. 4–28.
180. Regula C. Chemical cleaning/disinfection and ageing of organic UF membranes: A review / C. Regula et al. // Water Res., vol. 56, no. 1, 2014. – pp. 325–365.
181. Porcelli N. Chemical cleaning of potable water membranes: A review / N. Porcelli and S. Judd // Sep. Purif. Technol., vol. 44, no. 5, 2010. –

pp. 1389–1398.

182. K. Wegener Fluid elements in machine tools / K. Wegener et al. // CIRP Ann. - Manuf. Technol., vol. 66, no. 2, 2017. – pp. 611–634,

183. Луговський О. Ф. Можливості регенерації фільтруючих перегородок / О. Ф. Луговський, А. І. Зілінський, А. В. Шульга та І. А. Гришко // Mech. Adv. Technol., № 89. Київ, 2020. – С. 55–64.

184. Commercial Aircraft Hydraulic Systems. 2016.

185. Блянкман Л. М. Очистка фильтрующих материалов / Л. М. Блянкман, В. Г. Пономарев, и Н. Л. Смирнова / 2-е издание. Москва: Энергоиздат, 1982.

186. Белянин П. Н. Авиационные фильтры и очистители гидравлических систем / П. Н. Белянин и Ж. С. Черненко // М.: Машиностроение, 1964. – 295 с.

187. Коновалов В. М. Очистка рабочих жидкостей в гидроприводах станков / В. М. Коновалов, В. Я. Скрицкий, и В. А. Рокшевский // М. : Машиностроение, 1976. – 288 с.

188. Стельмах И. В. Автоматизация процесса очистки фильтров станочных гидроприводов на базе электрогидравлического импульсного устройства / И. В. Стельмах // Вестник Саратовского государственного технического университета, № 30, 2008. – С. 62–67,

189. Фридман В. М. Ультразвуковая химическая аппаратура / В. М. Фридман // Москва: Машиностроение, 1967. – 211 с.

190. Комаров В. М. Устройство для промывки фильтроэлемента / В. М. Комаров // 1519755, 1989.

191. Епоян С. М. Спосіб регенерації пористих перегородок горизонтального відстійника / С. М. Епоян, Д. Г. Сухоруков, и Т. С. Айрапетян // 95962, 2015.

192. Солодкий О. Д. Багатоступеневий конусний трубопровідний

фільтр-сепаратор / О. Д. Солодкий та В. О. Солодкий // 111202, 2015.

193. Пантелят Г. С. Спосіб регенерації катіонітових фільтрів з подальшою обробкою регенерату / Г. С. Пантелят, А. А. Сироватський, та Т. С. Эпоян // 64055 А, 2004.

194. Сиротинський О. А. Вібраційний фільтр / О. А. Сиротинський, С. О. Білоконь, І. І. Науменко, А. І. Щурок, С. Л. Форсюк// 43993, 2002.

195. Осипов Ю. И. Устройство для очистки фильтров / Ю. И. Осипов, В. А. Ермаков, В. В. Бондарик // 1124487, 1992.

196. Muramatsu H. The relationship between bubble motion and particle flocculation pattern under 20-kHz-ultrasound radiation in water / H. Muramatsu, S. Yanai, Y. Mizushima, and T. Saito // Chem. Eng. Sci., 2017.

197. Lamminen M. O. Mechanisms and factors influencing the ultrasonic cleaning of particle-fouled ceramic membranes / M. O. Lamminen, H. W. Walker, and L. K. Weavers // J. Memb. Sci., 2004.

198. Kyllönen H. M. Membrane filtration enhanced by ultrasound: A review / H. M. Kyllönen, P. Pirkonen, and M. Nyström // Desalination. 2005.

199. Хасанов М. М. Эжекторно-ультразвуковой способ очистки поверхности фильтрэlementов / М. М. . Хасанов // 2378036, 2010.

200. Е. С. Е. Sh. Ультразвук и его применения / Е. С. Е. Sh. // Uspekhi Fiz. Nauk, 1939.

201. Reuter F. Membrane cleaning with ultrasonically driven bubbles/ F. Reuter, S. Lauterborn, R. Mettin, and W. Lauterborn // Ultrason. Sonochem., № 37, 2017. – С. 542–560,

202. Федоткин И. М. Кавитация. Кавитационная техника и технология, их использование в промышленности. Часть 1 / И. М. Федоткин и И. С. Гулый // Киев: Полиграфкнига, 1997.

203. Луговський О. Ф. Математична модель процесу фільтрації в

ультразвуковому полі підвищеної інтенсивності / О. Ф. Луговський, А. І. Зілінський та І. А. Гришко // Вісник НТУУ «КПІ». Машинобудування, № 74. Київ, 2015. – С. 11–17.

204. Луговський О. Ф. Ультразвукове кавітаційне обладнання / О. Ф. Луговський, А. В. Мовчанюк, І. А. Гришко, А. І. Зілінський, О. О. Луговський // 108589, 2015.

205. Просвирнин В. И. Ультразвуковое устройство для фильтрации жидкостей / В. И. Просвирнин и И. П. Назаренко // 1590099, 1990.

206. Горелик Г. Б. Устройство для отделения дисперсных частиц от потока газа или жидкости / Г. Б. Горелик, В. И. Коробко, и В. К. Сыркин // 1242473, 1996.

207. Сучков А. Г. Устройство для ультразвуковой обработки жидкостей / А. Г. Сучков // 1819861, 1993.

208. Mizushima Y. Interaction between acoustic cavitation bubbles and dispersed particles in a kHz-order-ultrasound-irradiated water / Y. Mizushima, Y. Nagami, Y. Nakamura, and T. Saito // Chem. Eng. Sci., vol. 93, 2013. – pp. 395–400.

209. Niemczewski B. Chemical activation of ultrasonic cavitation / B. Niemczewski // Ultrason. Sonochem., vol. 6, no. 4, 1999. – pp. 211–216.

210. Yusof N. S. M. Physical and chemical effects of acoustic cavitation in selected ultrasonic cleaning applications / N. S. M. Yusof, B. Babgi, Y. Alghamdi, M. Aksu, J. Madhavan, and M. Ashokkumar // Ultrason. Sonochem., vol. 29, 2016. – pp. 568–576.

211. Lugovska K. Environmental safety technology of ultrasonic cavitation cleaning / K. Lugovska // Osteuropa Work. auf dem 22. Kasseler Abfall- und Bioenergieforum. Uni Kassel Transf. Ost-West-Wissenschaftszentrum, Kassel, 2010. – p. 27.

212. Акуличев В. А. Гидратация ионов и кавитационная прочность воды / В. А. Акуличев // Акустический журнал, № 12, 1966. – С. 160–166.
213. Mason T. J. Potential uses of ultrasound in the biological decontamination of water / T. J. Mason, E. Joyce, S. S. Phull, and J. P. Lorimer // Ultrasonics Sonochemistry, 10 (6), 2003. 319-323.
214. Xu H. Cavitation dose in an ultrasonic cleaner and its dependence on experimental parameters / H. Xu, J. Tu, F. Niu, and P. Yang // Appl. Acoust., vol. 101, 2016 pp. – 179–184.
215. Перник А. Д. Проблемы кавитации / А. Д. Перник // Ленинград: Судостроение, 1988. – 440 с.
216. Кувшинов Г. И. Акустическая кавитация у твердых поверхностей / Г. И. Кувшинов и П. П. Прохоренко // Минск: Навука і техника, 1990. – 112 с.
217. Tao Y. Application of Hydrodynamic Cavitation to Wastewater Treatment / Y. Tao, J. Cai, X. Huai, B. Liu, and Z. Gu // Chemical Engineering and Technology, vol. 39, no. 8, 2016. – pp. 1363–1376.
218. Dular et M. Use of hydrodynamic cavitation in (waste)water treatment / M. Dular et al // Ultrason. Sonochem., vol. 29, 2016. – pp. 577–588.
219. Марчук Л. В. Влияние ультразвуковой кавитации на жизнеспособность микроорганизмов / Л. В. Марчук, А. Ф. Прокопенко, А. Ф. Луговской и И. А. Гришко // Наукові праці ДонНТУ. Серія гірничо-електромеханічна, № 195, 2011. – С. 195–206.
220. Verhaagen B. Measuring cavitation and its cleaning effect / B. Verhaagen and D. Fernandez Rivas // Ultrason. Sonochem., vol. 29, 2016. – pp. 619–628.
221. Minnaert M. XVI. On musical air-bubbles and the sounds of

running water / M. Minnaert // London, Edinburgh, Dublin Philos. Mag. J. Sci., 1933.

222. Луговской А. Ф. Исследование рабочей зоны высокоамплитудного кавитационного ультразвукового привода / А. Ф. Луговской, А. В. Мочанюк, В. П. Фесич, и И. А. Гришко // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету ім. М.Остроградського, № 49. Кременчук, 2008. – С. 81–85.

223. Прандтль Л. Гидроаэромеханика / Л. Прандтль // ГИИТЛ, 1949.

224. Агранат Б. А. О скорости и энергии абразивной частицы в кавитирующей жидкости. Ультразвуковые методы интенсификации технологических процессов / Б. А. Агранат, В. И. Башкиров, В. А. Докучаева, и А. П. Чернов // Ультразвуковые методы интенсификации технологических процессов, 1970. – С. 43–59.

225. Агранат Б. А. Ультразвуковая техника / Б. А. Агранат // Монография. – М.: Наука, 1967. – 379 с.

226. Розенберг Л. Д. Труды VI всесоюзной акустической конференции, серия Д11 / Л. Д. Розенберг // Изд-во АН СССР, 1968.

227. Кнэпп Р. Кавитация / Р. Кнэпп, Д. Дейли и Ф. Хеммит // М.: Мир, 1974. – 678 с.

228. Зилинский А. И. Математическая модель процесса фильтрации в ультразвуковом поле повышенной интенсивности / А. И. Зилинский, А. Ф. Луговской и И. А. Гришко // Вісник НТУУ «КПІ». Машинобудування збірник наукових праць, № 74. Київ, 2015. – С. 11–17.

229. Ландау Л. Д. Теория упругости / Л. Д. Ландау и Е. М. Лившиц // Москва: Наука, 1987. – 248 с.

230. Глушак Б. Л. Исследование прочности материалов при

динамических нагрузках / Б. Л. Глушак, В. Ф. Куропатенко и С. А. Новиков // Новосибирск: Наука, 1992. – 295 с.

231. Морозов Н. Ф. Проблемы динамики разрушения твердых тел / Н. Ф. Морозов и Ю. В. Петров // Санкт-Петербург: С.-Петербургского университета, 1997. – 132 с.

232. Кильчевский Н. А. Теория соударений твердых тел / Н. А. Кильчевский // Киев: Наукова думка, 1969. – 246 с.

233. “ANSYS® Academic Research Mechanical, Release 2019R3.” [Online]. Available: <https://www.ansys.com/en-in/academic/free-student-products>. [Accessed: 11-Dec-2019].

234. Laboratory L. A. S. Selected Hugoniot, La-4167-MS, 1969.

235. Johnson G. R. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures / G. R. Johnson and W. H. Cook // Eng. Fract. Mech., 1985.

236. Hunt E. M. Impact ignition of nano and micron composite energetic materials / E. M. Hunt, S. Malcolm, M. L. Pantoya and F. Davis // Int. J. Impact Eng., 2009.

237. Зилинский А. И. Математическая модель процесса фильтрации в ультразвуковом поле повышенной интенсивности / Зилинский А. И., Луговской А. Ф., Гришко И. А. // Вісник НТУУ «КПІ». Машинобудування : збірник наукових праць. – 2015. – № 2(74). – С. 11–17

238. Игнациус Г. И. Теория поля / Г. И. Игнациус // Москва: Знание, 1971. – 112 с.

239. Лепендин Л. Ф. Акустика / Л. Ф. Лепендин // Учебн. Пособие для вузов. Москва: Высшая школа, 1978. – 448 с.

240. Nakayama T. Higher mathematics for physics and engineering / T. Nakayama and H. Shima // Berlin, Heidelberg: Springer, 2011.

241. Тимошенко С. П. Колебания в инженерном деле / С. П. Тимошенко, Д. Х. Янг и У. Уивер // Пер. с англ. Л.Г Корнейчука. Москва: Машиностроение, 1985. – 472 с.
242. Guggenberger J. Vibrations / J. Guggenberger and G. Müller // in Handbook of Engineering Acoustics, Berlin, Heidelberg: Springer, 2013. – pp. 651–690.
243. Кумабэ Д. Вибрационное резание / Д. Кумабэ // Москва: Машиностроение, 1985. – 424 с.
244. Богуслаев В. А. Формирование поверхностного слоя деталей выглаживанием с ультразвуковым нагружением / В. А. Богуслаев и др. // Монография. Запорожье : Мотор Сич, 2012. – 233 с.
245. Луговський О. Ф. Пристрій для кавітаційної обробки рідини / О. Ф. Луговський, І. А. Гришко, та А. В. Мовчанюк / Київ, 2010.
246. Luhovskyi A. F. The Impact of Static Pressure on the Intensity of Ultrasonic Cavitation in Aqueous Media / A. F. Luhovskyi, I. A. Gryshko, A. I. Zilinskiy, and V. V. Patsola // J. Water Chem. Technol., vol. 40, no. 3, 2018. – pp. 285–299.
247. Luhovskyi O. Enhancing the Efficiency of Ultrasonic Wastewater Disinfection Technology / O. Luhovskyi, I. Bernyk, and I. Gryshko // J. Water Chem. Technol., vol. 40, no. 2, 2018. – pp. 95–101.
248. Богачев И. Н. Повышение кавитационно-эрозионной стойкости деталей машин / И. Н. Богачев, Р. И. Минц. – М.: Машиностроение, 1964. – 144 с.
249. Богачев И. Н. Кавитационные разрушения и кавитационностойкие сплавы / И. Н. Богачев, Р. И. Минц. – М.: Металлургия, 1972. – 179 с.
250. Глазков М. М. Кавитация в жидкостных системах воздушных судов: Учебное пособие / М. М. Глазков, В. Г. Ланецкий,

Н. Г.Макаренко, И. П.Челюканов. Киев: КНИГА, 1987. – 64с.

251. Глазков М. М. Эрозия алюминиевых сплавов в среде авиационных масел и топ-лив / М. М. Глазков, С. В. Пилипенко и В. Н. Куринков // Исследование процессов подготовки, применения и контроля качества авиаГСМ и спецжидкостей, 1991. – С. 26–27.

252. Backe W. Kavitation und kavitations erosion in hydraulischen System / W. Backe and W. Kleinbreuer // Konstrukteur, vol. 12, no. 4, 1981. – pp. 32–46.

253. Присс К. Эрозия / К. Присс. – М.: Мир, 1982. – 464 с.

254. Conn A. F. Some unusual applications for cavitating water jets / A. F. Conn, V. E. Johnson, W. T. Lindenmuth, G. L. Chaine, and G. Frederick // Proc. 7th Int. Symp. Jet Cut. Techn, 1984. – pp. 1–12.

255. Šarc A. The issue of cavitation number value in studies of water treatment by hydrodynamic cavitation / A. Šarc, T. Stepišnik-Perdih, M. Petkovšek, and M. Dular // Ultrason. Sonochem., vol. 34, 2017. – pp. 51–59.

256. Галин Л. А. Возникновение кавитации при обтекании выступа на стенке в плоском канале / Л. А. Галин, А. П. Фролов, К. К. Шальнев // Прикладная механика в технической физике, № 4, 1970. – С. 172–175.

257. Луговской А. Ф. Повышение производительности ультразвуковых распылителей жидкости / А. Ф. Луговской, А. В. Мовчанюк, А. И. Зилинский, и А. Д. Лавриненков // Mech. Adv. Technol., № 80. Киев, 2017. – С. 113–122.

258. Луговський О. Ф. Дослідження впливу ультразвукової кавітації на конструкційні матеріали / О. Ф. Луговський, А. І. Зілінський, І. А. Гришко, та В. В. Жила // Матеріали ХХІV міжнародної науково-технічної конференції “Гідроаеромеханіка в інженерній практиці. Київ, 2019. – С. 85–87.

259. Березюк О. В. Планування багатфакторного експерименту для дослідження вібраційного гідроприводу ущільнення твердих побутових відходів / О. В. Березюк // Вібрації в техніці та технологіях, № 55. Вінниця, 2009. – С. 92–97.
260. Березюк О. В. Моделювання компресійної характеристики твердих побутових відходів у сміттєвозі на основі комп'ютерної програми 'PlanExp' / О. В. Березюк // Вісник Вінницького політехнічного інституту, № 6. Вінниця, 2016. – С. 23–28.
261. Адлер Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова и Ю. В. Грановский. Москва: Наука, 1976. – 278 с..
262. Равская Н.С. Разработка прогрессивных режущих инструментов на основе моделирования их работы методом самоорганизации: Дис. докт. техн. наук: 05.03.01.-К., 1991. – 370 с.
263. Драган Я. П. Структура и представления моделей стохастических сигналов / Я. П. Драган. Киев: Наукова думка, 1980. – 384 с.
264. Learning algorithms, 2017. [Online]. Available: https://gmdhsoftware.com/docs/learning_algorithms. [Accessed: 10-Aug-2020].
265. Равська Н.С. Технологія інструментального виробництва / Равська Н.С., Мельничук П.П., Кас'янов А.Г., Родін Р.П. // Житомир: ЖІТІ. – 2001. – 555с.
266. Download GMDH Shell for Data Science, 2020. [Online]. Available: <https://gmdhsoftware.com/signup-ds>. [Accessed: 10-Aug-2020].
267. Агранат Б. А. Способ измельчения материалов / Б. А. Агранат, В. И. Башкиров, Я. И. Израилович, Ю. И. Китайгородский, и А. В. Кутузов // А.С.170435, 1965.

268. Башкиров В. И. Эффективный метод управления процессом ультразвуковой кавитации / В. И. Башкиров // Промышленное применение ультразвука, 1965. – С. 3–14.
269. Агранат Б. А. Способ повышения эффективности воздействия ультразвука на процессы протекающие в гидкостях / Б. А. Агранат, В. И. Башкиров, и Ю. И. Китайгородский // Ультразвуковая техника, № 3, 1964. – С. 28–35.
270. Агранат Б. А. Использование избыточного статического давления для управления процессом ультразвуковой кавитации / Б. А. Агранат, В. И. Башкиров, и Ю. И. Китайгородский // Ультразвуковая техника, № 1, 1966. – С. 6–14.
271. Розенберг Л. Д. Физика и техника мощного ультразвука. т. 2./ Л. Д. Розенберг, Ed. // М.: Наука, 1968. – 268 с.
272. Leong T. The fundamentals of power ultrasound - A review / T. Leong, M. Ashokkumar, and K. Sandra // Acoustics Australia. 2011.
273. Вакуленко М. О. Тлумачний словник із фізики / М. О. Вакуленко и О. В. Вакуленко // Київ: Видавничо-поліграфічний центр «Київський університет», 2008. – 767 с.

Підписано до друку 18.02.2022
Формат 60x84/16. Папір офсетний. Друк цифровий. Гарнітура
Times new roman. Умовних друкованих аркушів 16,5
Наклад 100 прим. За. № №588 від 18.02.2022
Видавець ФОП Кушнір Ю.В.
Реєстраційне свідоцтво про внесення суб'єкта
видавничої справи до Державного реєстру видавців
серія ДК № 5909 від 18.09.2017 р.
Віддруковано з оригіналу макету замовника в
ТОВ «Друк плюс» м. Вінниця, вул. 600-річчя, 25, 21027.