

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Факультет автоматизації та енергетики

Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій та енергетичного
менеджменту

Кровопусков Герман Юрійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 620.179
(індекс)

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

Удосконалення методів підвищення рівня якості води

(назва роботи)

Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка

(назва освітньої програми)

152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка

(шифр і назва спеціальності)

Робота містить результати власних досліджень, використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело:

Здобувач освітнього ступеня _____ Г. Ю.
Кровопусков

(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник _____ Лютак Зіновій Петрович к.т.н.,
проф.

(підпис, прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання керівника)

Допущено до захисту
Завідувач кафедри

_____ Віталій ЦИХ
(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Івано-Франківськ – 2025

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет автоматизації та енергетики

Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій та енергетичного менеджменту

Освітній рівень перший (бакалаврський)

Спеціальність 152- Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ІВТЕМ

В.С. Цих

« » 20 року

**З А В Д А Н Н Я
НА БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ**

Кровоушкову Герману Юрійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Удосконалення методів підвищення рівня якості води

керівник роботи Лютак Зіновій Петрович, к.т.н., проф.,

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від “30” квітня 2025 року № 270/7

2. Строк подання студентом роботи 20.06.2025

3. Вихідні дані до роботи частота ультразвукових хвиль, використаних в даній роботі – 40 кГц, об'єм води – 0,00025 м³ (250 см³), температура води – ~35-40°C

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Основні теоретичні відомості про властивості води

2. Ультразвукові хвилі та їх використання

3. Розроблення моделі функціонуючої лабораторної установки для очищення води

4. Метрологічний аналіз лабораторної установки

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

1. Класифікація основних методів очищення води

2. Схема виникнення акустичної кавітації

3. Схема виникнення гідродинамічної кавітації

4. Структурна схема очищення води УЗ хвилями на практиці

5. Структурна схема функціонування лабораторної установки

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
4	Кривенко Г.М., доц. каф. ТЗНС та БП		
нормо контроль	Лютак З.П., проф. каф. ІВТЕМ		

7. Дата видачі завдання 05.05.2025р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	<i>Вступ</i>	15.05.2025	
2.	<i>Основні теоретичні відомості про властивості води</i>	18.05.2025	
3.	<i>Ультразвукові хвилі та їх використання</i>	01.06.2025	
4.	<i>Розроблення методу очищення та фільтрації води з використанням ультразвукових хвиль</i>	10.06.2025	
5.	<i>Метрологічний аналіз лабораторної установки</i>	15.06.2025	
6.	<i>Охорона праці</i>	15.06.2025	
7.	<i>Оформлення бакалаврської роботи</i>	20.06.2025	

Студент _____
(підпис)

Кривоносов Г. Ю.
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____
(підпис)

Лютак З. П.
(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Бакалаврська робота: «Удосконалення методів підвищення рівня якості води»

Кровопусков Г. Ю., ІФНТУНГ, 2025, 127 с., 20 рис., 11 табл., 35 джерел.

Об'єкт дослідження: Системи покращення якості води з використанням фізико-технічних методів впливу, зокрема ультразвукової обробки.

Мета роботи: Удосконалення методів підвищення якості води шляхом розробки та оптимізації параметрів ультразвукового впливу, що сприяють зниженню бактеріологічної та фізико-хімічної забрудненості води, та побудуванні математичної моделі лабораторної установки яка б втілила концепт в реальність.

У даній бакалаврській роботі проведено аналіз сучасних методів очищення води та обґрунтовано доцільність застосування ультразвукової кавітації як ефективного фізичного чинника впливу. Розроблено експериментальну систему, що включає генератор, підсилювач потужності, ультразвуковий перетворювач та додаткові вимірювальні прилади. Здійснено теоретичні та практичні дослідження впливу інтенсивності, частоти та температури на ефективність знезараження.

ABSTRACT

Bachelor's thesis: "Improvement of methods for increasing the level of water quality" Krovopuskov H. Y., IFNTUOG, 2025, 127 pages, 20 figures, 11 tables, 35 references.

Research object: Water quality improvement systems using physical and technical methods of influence, in particular ultrasonic treatment.

Objective: Improvement of methods for improving water quality by developing and optimizing the parameters of ultrasonic exposure, which contribute to the reduction of bacteriological and physicochemical contamination of water, and building a mathematical model of a laboratory installation that would translate the concept into reality.

In this bachelor's thesis, an analysis of modern methods of water purification was carried out and the feasibility of using ultrasonic cavitation as an effective physical factor of influence was substantiated. An experimental system including a generator, a power amplifier, an ultrasonic transducer and additional measuring instruments was developed. Theoretical and practical studies of the influence of intensity, frequency, and temperature on the disinfection efficiency were carried out.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
1. ОСНОВНІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ ПРО ВЛАСТИВОСТІ ВОДИ.....	10
1.1 Основні параметри води.....	11
1.2 Оцінювання якості води.....	15
1.3 Сучасні методи очищення води.....	23
2. УЛЬТРАЗВУКОВІ ХВИЛІ ТА ЇХ ВИКОРИСТАННЯ.....	32
2.1 Основні теоретичні відомості про фізичні властивості ультразвукових хвиль.....	33
2.1.1 Класифікація коливань.....	34
2.1.2 Характеристики ультразвукових хвиль.....	40
2.2 Пристрої ультразвукових хвиль та їх практичне застосування.....	55
3. РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДУ ОЧИЩЕННЯ ТА ФІЛЬТРАЦІЇ ВОДИ З ВИКОРИСТАННЯМ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ХВИЛЬ.....	72
3.1 Теоретичні основи знезараження та аерації води.....	74
3.2 Розроблення методів та пристроїв ультразвукового очищення води.....	94
3.3 Метрологічне забезпечення.....	101
4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА АНАЛІЗ НЕБЕЗПЕК ПІД ЧАС РОБОТИ.....	112
ВИСНОВКИ.....	127
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	128

ВСТУП

Зі збільшенням потреб людства, технології також мають розвиватись щоб задовольнити їх в повному обсязі. Дані потреби можуть простягатись від життєво необхідних, як чисте повітря та достаток їжі, до забаганок для підтримання високого рівня задоволеності життям, як виробництва аксесуарів. Але не дивлячись на те, що саме людям потрібно, сучасний рівень технології фактично вже здатний забезпечити абсолютно кожний пункт. Таким чином ми маємо можливість зосередитись на важливих для нас речах.

З іншого боку, споглядаючи в минуле, людство заплатило високу ціну щоб досягти сьогоdnішнього рівня розвитку, і більше всього від цього постраждала природа навколо нас. Людство існує на кожному континенті, у кожному просторі, використовуючи ресурси планети часто необдумано, особливо це помітно в попередніх століттях. Забруднення води, землі, повітря в неймовірних масштабах, спустошення територій та руйнування цілих локальних екосистем.

З розвитком цивілізацій, людство зрозуміло і прийняло важливість збереження та охорони природи, тому були прийняті певні заходи для підтримання та ефективного покращення стану природи. Одним з таких способів стало очищення вже забруднених ділянок землі та водойм з метою відновлення попереднього стану речей та покращення загального стану екології.

Традиційні методи очищення води, попри свою ефективність, часто є енерговитратними, хімічно агресивними або недостатньо ефективними у боротьбі з сучасними типами забруднень, зокрема мікропластиком, фармацевтичними залишками та патогенами. У цьому контексті дедалі більший інтерес викликають фізичні методи очищення, зокрема ультразвукові технології.

Ультразвук – це високочастотні механічні коливання, здатні створювати складні фізико-хімічні явища в рідкому середовищі (наприклад, кавітація).

Саме ці ефекти забезпечують розпад органічних речовин, руйнування клітинних структур мікроорганізмів та прискорення процесів коагуляції.

Мета роботи: дослідження можливостей застосування ультразвукових хвиль для очищення води у різних контекстах – як природних водойм, так і систем питного водопостачання. У роботі також розглядаються альтернативні методи очистки з метою комплексного порівняння ефективності, екологічної безпеки та економічної доцільності.

Актуальність дослідження: потреба у створенні екологічно безпечних, доступних та високоефективних технологій водоочищення, які могли б бути впроваджені у масштабах як локальних комунальних систем, так і промислових підприємств. Використання ультразвукових хвиль для вирішення проблеми забруднення води є одним з найперспективніших методів через ряд причин, які будуть детально описані, досліджені та перевірені в ході виконання даної роботи.

Предмет: Об'єкт екосистеми – водойми та водосховища.

Об'єкт дослідження: акустичні методи моніторингу та раціонального регулювання якості води

1. ОСНОВНІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ ПРО ВЛАСТИВОСТІ ВОДИ

Вода (H_2O) – одна з найпоширеніших і найважливіших хімічних сполук на Землі, без якої неможливе існування життя. Вона бере участь у численних фізико-хімічних процесах та присутня у хімічному складі будь-якої живої істоти. Незважаючи на свою просту хімічну формулу, вода має унікальні властивості, які вирізняють її серед інших речовин.

Характеристики молекули води зумовлені її будовою та полярністю, що впливають на міжмолекулярні взаємодії, фазові переходи та теплоємність. Саме ці властивості пояснюють її здатність підтримувати температурний баланс у біосфері, розчиняти різноманітні речовини та брати участь у кислотно-основних та окисно-відновних реакціях. Знання базових теоретичних відомостей про воду є необхідним для розуміння багатьох природних і технічних процесів.

У цьому розділі розглядаються основні теоретичні відомості про хімічну сполуку H_2O , зокрема її молекулярна структура, фізико-хімічні властивості та значення в оточуючих нас середовищах та системах. Також представляються методи очищення води, представляючи можливість зрозуміти наскільки сильне значення чиста вода має, і її вплив на існування усіх живих організмів.

1.1 Основні параметри води

Вода – це хімічна сполука з формулою H_2O , що має в своєму складі один атом кисню та два атоми водню. **Молекула води** складається з двох атомів Гідрогену та одного атома Оксигену, які утворюють геометричну структуру у формі рівнобедреного трикутника. Існує дев'ять стабільних ізотопних форм води, серед яких найбільш поширеною є **звичайна (легка) вода** – $^1H_2^{16}O$ (приблизно 99,73 %).

Кут між зв'язками Н–О–Н становить приблизно $104,5^\circ$, що надає молекулі кутової форми. Через значну електронегативність атома Оксигену зв'язки О–Н є полярними: Гідроген має частковий позитивний заряд, а Оксиген – частковий негативний. Це створює асиметричний розподіл зарядів у молекулі, що робить її електричним диполем. Завдяки цьому вода здатна ефективно взаємодіяти з іонами та полярними молекулами, що забезпечує її виняткову здатність розчиняти широкий спектр речовин. Саме електростатичні взаємодії між молекулами води та розчиненими частинками є основою утворення гідратів у розчинах [1].

Вода становить від 50 до 97 % маси більшості організмів, зокрема рослин і тварин, при цьому вміст води в тілі людини сягає приблизно 70 %. Усі біохімічні реакції в живих системах відбуваються виключно у водному середовищі, що зумовлює її незамінну роль у підтримці життєдіяльності. Крім того, вода виконує важливу кліматоутворювальну функцію – вона стабілізує температуру на поверхні Землі, пом'якшуючи добові та сезонні коливання **[Ошибка! Источник ссылки не найден.]**.

Ця сполука є невід'ємною складовою переважної більшості технологічних процесів у промисловості та сільському господарстві. Водне середовище також домінує на планеті географічно – води покривають близько 75 % її поверхні. Усі клітини живих організмів функціонують як водні розчини, а природні води, що циркулюють у біосфері, забезпечують життєво необхідні обміни речовин та енергії.

Вода виступає універсальним розчинником, здатним розчиняти найбільшу кількість відомих речовин, що зумовлено її особливими фізико-хімічними властивостями – полярністю, високою діелектричною проникністю, здатністю до утворення водневих зв'язків тощо. Саме завдяки цим характеристикам вона є ключовим чинником існування життя на Землі.

Чиста вода – це прозора безбарвна рідина, яка має найбільшу густину за температури 4 °С, що становить 1,00 г/см³. За подальшого зниження температури густина води зменшується, унаслідок чого лід має меншу густину й утримується на її поверхні. За нормального атмосферного тиску (101,3 кПа або 1 атм) вода замерзає при 0 °С і кипить при температурі 100 °С [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**].

Одна з унікальних властивостей води – її висока теплоємність, яка дорівнює 4,17 Дж/(г·К). Щоб розплавити лід при температурі 0 °С, потрібно затратити 333,98 Дж/г, а для повного випаровування води при температурі 100 °С – 2253 Дж/г. Такі показники зумовлюють важливу терморегуляційну функцію води в природних і технічних процесах.

Молекулярна маса водяної пари, розрахована за її хімічною формулою, становить 18. Проте експериментальні дані свідчать, що навіть за температур, близьких до точки кипіння, реальна молекулярна маса водяної пари перевищує розрахункову. Це пояснюється схильністю молекул води до утворення об'єднань – асоціатів або димерів, що свідчить про здатність води до міжмолекулярної взаємодії, зокрема за рахунок водневих зв'язків.

Згідно з [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**] однією з помітних аномальних властивостей води є її надзвичайно велике значення поверхневого натягу, яке становить 0,073 Н/м за температури 20 °С. Серед усіх відомих рідин вищий показник спостерігається лише у ртуті. Ця властивість проявляється в тому, що вода має тенденцію до мінімізації площі своєї поверхні, попри те що приймає форму посудини, в якій перебуває.

Саме завдяки значному поверхневому натягу вода утворює характерні кулясті краплі при вільному падінні або у стані невагомості. Сферична форма

виникає тому, що вона забезпечує найменшу площу поверхні для заданого об'єму рідини, що є енергетично вигідним станом.

Керуючись [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**], усі розчини належать до групи *дисперсних систем*. Це така система, в якій по всьому об'єму однієї речовини (*дисперсійне середовище*) рівномірно розподілена деяка інша речовина (*дисперсійна фаза*) у вигляді надзвичайно малих частинок.

Зазвичай дисперсні системи класифікують за ступенем дисперсності, тобто розмірі частинок, з яких складається дисперсна фаза. До *грубодисперсних* відносять системи з частинками, розмір яких перевищує 10^{-5} м. *Тонкодисперсні* або *мікрогетерогенні* системи характеризуються частинками розміром від 10^{-5} м до 10^{-7} м. *Колоїднодисперсні* (ультрамикрогетерогенні) системи включають частинки ще меншого розміру – в межах від 10^{-7} м до 10^{-9} м.

Такий поділ дозволяє чітко охарактеризувати фізико-хімічні властивості різних типів дисперсних систем, оскільки розміри частинок визначають їхню взаємодію із середовищем, прозорість, стабільність та здатність до дифузії.

Коли речовина, що утворює дисперсну фазу, подрібнена до молекулярних або іонних розмірів (менших за 1 нм), виникає однорідна система, яка називається істинним розчином або просто *розчином*. У таких системах відсутня межа поділу між дисперсною речовиною та розчинником (дисперсійним середовищем), що обумовлює їхню однорідність. Завдяки цій структурній особливості, істинні розчини мають високу стабільність, на відміну від неоднорідних (гетерогенних) систем, де наявність міжфазової поверхні сприяє розшаруванню.

Отже, *розчин* можна визначити як однорідну, термодинамічно стабільну систему змінного складу, що складається з двох або більше компонентів, у якій один або кілька компонентів рівномірно розподілені на молекулярному чи іонному рівні.

Показником розчинності речовини приймається *концентрація* насиченого розчину цієї речовини. Розчинність зумовлюється низкою факторів,

зокрема полярністю молекул, наявністю сторонніх домішок, температурним режимом, а також тиском – особливо у випадку газів.

Під **концентрацією** розчиненої речовини розуміють показник, що відображає масу або кількість речовини, яка присутня в певному об'ємі чи масі розчину або самого розчинника [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**].

Для класифікації речовин за ступенем розчинності зазвичай орієнтуються на кількість речовини, що розчиняється в 100 г води. При ≥ 10 г речовину приймають добре розчинною, при < 1 г – малорозчинною, і при $< 0,01$ г – практично нерозчинною.

Розчинений кисень (DO, від англ. *Dissolved Oxygen*) – це форма молекулярного кисню (O_2), що знаходиться у водному середовищі в газоподібному стані на молекулярному рівні. Він не утворює хімічних сполук із водою, а перебуває в ній у вигляді фізично розчиненого газу. Джерелами розчиненого кисню є атмосферне повітря (через дифузію на межі повітря–вода) та фотосинтетична активність водоростей або інших водних рослин.

Ступінь насичення води киснем – це величина, яка показує, наскільки фактичний вміст кисню у воді наближений до максимально можливого при заданих фізичних умовах (температура, тиск, солоність). **Максимальна концентрація розчиненого кисню** залежить від температури: чим холодніше середовище, тим вища здатність води утримувати кисень. Наприклад, при $0\text{ }^\circ\text{C}$ насичення може становити до ~ 14.6 мг/л, тоді як при $30\text{ }^\circ\text{C}$ – лише ~ 7.5 мг/л.

Масова концентрація розчиненого кисню визначається в міліграмах кисню на літр води:

- 0–2 мг/л – небезпечні умови для більшості водних організмів
- 5–8 мг/л – сприятливе середовище
- 9–14 мг/л – добре насичена вода

Об'ємна частка кисню в розчині визначає, яку частину об'єму займає молекулярний кисень. При $20\text{ }^\circ\text{C}$ та 1 атм повітря вміст O_2 становить близько 21 % за об'ємом, але у воді при повному насиченні – лише близько 2–3% об'єму рідини.

1.2 Оцінювання якості води

Якість води – це узагальнена характеристика її складу та властивостей, яка визначає можливість використання води для певних цілей, таких як питне водопостачання, рибогосподарські потреби, технічне або промислове застосування. Цей показник формується на основі сукупності фізичних, хімічних та мікробіологічних властивостей водного середовища. Для об'єктивної оцінки цієї відповідності використовують науково обґрунтовані критерії якості – конкретні показники, що характеризують стан водного середовища. Кожен з таких показників має встановлену гранично допустиму концентрацію, перевищення якої може зробити воду непридатною для запланованого використання. Вміст цих речовин визначає такі параметри, як солоність, жорсткість, кислотно-лужний баланс, агресивність і корозійна здатність води [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**].

Поняття “якість води” полягає у відповідності її фізико-хімічних характеристик потребам конкретного водокористувача. Для об'єктивної оцінки цієї відповідності використовують науково обґрунтовані критерії якості – конкретні показники, що характеризують стан водного середовища. Кожен з таких показників має встановлену гранично допустиму концентрацію, перевищення якої може зробити воду непридатною для запланованого використання. Таким чином, якість води є ключовим фактором у забезпеченні екологічної безпеки та функціонування різних галузей водоспоживання.

Якість води визначається сукупністю її хімічних, біологічних компонентів і фізичних характеристик, що визначають її придатність для конкретних форм водокористування. Вона є ключовим показником водних ресурсів, що впливає на їх ефективне використання, а також на заходи із запобігання забрудненню та виснаженню. За [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**], основні параметри якості води включають:

1. **Вміст грубодисперсних домішок** (наприклад, пісок, глина, мул, планктон) зумовлюють каламутність. Їх вміст визначають гравіметричним методом після фільтрування через фільтр типу «синя стрічка».

2. **Смак і запах** залежать від природи та концентрації розчинених речовин. Якісна вода не повинна мати запаху. Природні запахи можуть бути болотистими, рибними або торф'яними, тоді як техногенні – хлорні, металеві тощо. Оцінка запаху і смаку проводиться за п'ятибальною шкалою.

3. **Водневий показник (рН)** – один з основних параметрів, що впливає на перебіг хімічних і біологічних реакцій у воді. Значення рН визначає біологічну активність водного середовища, здатність до перенесення елементів, корозійну агресивність. У природних умовах рН води зазвичай варіюється в межах 6,5–9. Визначення проводиться потенціометрично із застосуванням рН-метра.

4. **Лужність** визначається властивістю води нейтралізувати кислоти за рахунок наявності гідроксидів, карбонатів, гідрогенкарбонатів та інших аніонів. В загальноприйнятому розумінні лужність визначають як кількість конкретно використаної в дослідженні кислоти, що нейтралізується у 1 дм³ води. рН таких вод не перевищує 8,3 ммоль/дм³. Для розрахунків використовують також рН та співвідношення карбонатних форм.

5. **Кольоровість** обумовлена присутністю гумінових речовин і заліза у розчиненій формі. Оцінюється в градусах за дихроматно-кобальтовою шкалою.

6. **Окисненість** вказує на кількість речовин, здатних до окиснення. Виражається у мг кисню, витраченого на окиснення речовин у 1 л води. Для слабозабруднених вод визначається перманганатна окисненість, а для більш забруднених – дихроматна (ХСК).

7. **Біохімічне споживання кисню** – об'єм кисню, необхідний для аеробного розкладання органічних речовин у воді за певних умов (температура 20 °С, відсутність світла й повітря). Вимірюється у мг О₂/л. Допустимі значення БСК: до 3 мг/л для питного водопостачання, до 6 мг/л – для культурно-побутового використання.

8. **Твердість** характеризує сумарний вміст йонів кальцію та магнію у воді (ммоль/дм³).

9. **Сухий залишок** – загальна маса розчинених органічних та неорганічних речовин, що залишається після випаровування 1 л води.

10. **Температура** виступає одним із ключових факторів, який визначає інтенсивність біологічних, фізичних і хімічних процесів у водному середовищі, зокрема тих, що пов'язані з очищенням та дезінфекцією води. Вона впливає на розчинність кисню у воді, активність мікробіологічних агентів, а також швидкість перебігу окисно-відновних реакцій. Для питної води оптимальною вважається температура 7–11 °С, а гранично допустимою – 35 °С.

11. **Загальний солевміст** – сумарна концентрація усіх розчинених неорганічних солей (мг/л), визначена за іонним складом або через електропровідність.

12. До **важких металів**, зокрема свинцю, ртуті, хрому та міді, належать елементи, що здатні чинити виражений токсичний і мутагенний ефект. Їхня присутність у навколишньому середовищі дестабілізує природні біохімічні процеси в екосистемах і становить серйозну загрозу для здоров'я людини..

Академік Л. А. Кульський (АН України) запропонував класифікацію водяних домішок за їх фазово-дисперсними характеристиками. Згідно з цією концепцією, усі домішки, що можуть бути присутні у водному середовищі, поділяються на чотири категорії за їхніми фізико-хімічними властивостями [Ошибка! Источник ссылки не найден.].

До гетерогенних систем належать дисперсії, які складаються із завислих частинок (суспензій), колоїдних агрегатів, емульгованих структур або піноподібних утворень. Гомогенні системи, натомість, представлені речовинами, здатними формувати з водою справжні іонні чи молекулярні розчини.

Як природна, так і стічна вода є прикладами дисперсних середовищ, де включення домішок формують дисперсну фазу, а сама вода виступає як дисперсійне середовище (табл. 1.1) [Ошибка! Источник ссылки не найден.].

Таблиця 1.1 – Класифікація частинок дисперсної фази за їхнім розміром

Дисперсна система	Розмір частинок дисперсної фази, см	Група
Гетерогенна	$10^{-3} - 10^{-5}$	I
	$10^{-5} - 10^{-6}$	II
Гомогенна	$10^{-6} - 10^{-7}$	III
	$< 10^{-7}$	IV

I група – грубодисперсні домішки

Частинки розміром 10^{-5} – 10^{-3} см завдяки своїй взаємодії з водою можуть утворювати піни, емульсії та суспензії. Саме вони найчастіше зумовлюють каламутність води. До них також відносять органічні залишки, планктон, пісок, пластмаси, глини тощо. Такі системи нестійкі й потребують постійного руху води для збереження завислого стану.

Видалення здійснюється шляхом відстоювання, фільтрації, коагуляції, флоатації, а також використанням мікропроціджування, центрифугування.

Знезараження проводять хлором, озоном, сріблом, УФ-випромінюванням або ультразвуком.

II група – колоїдні домішки

Частинки розміром 10^{-5} – 10^{-6} см – це гідрофільні/гідрофобні колоїди, органомінерали, гумусові речовини, віруси. Вони надають воді забарвлення і впливають на окислюваність.

Ці стійкі колоїдні системи видаляють шляхом коагуляції, флокуляції, а також окисленням. Методи знезараження аналогічні до першої групи.

III група – молекулярно-дисперсні домішки

Частинки 10^{-6} – 10^{-7} см – це розчинені гази, органічні сполуки природного і техногенного походження, продукти розпаду біоти, феноли, спирти, альдегіди. Вони викликають запах, присмак, іноді забарвлення води.

Очищення здійснюють за допомогою аерації, окислення, адсорбції, електролізу, екстракції або випаровування.

IV група – іонно-дисперсні домішки

Частинки менше 10^{-7} см – це солі, кислоти, основи, які утворюють істинні електролітні розчини. Іони змінюють структуру води: малі – майже не впливають, середні – утворюють гідратні оболонки, великі – значно порушують структуру, змінюючи фізико-хімічні властивості (щільність, ентропію, стисливість). Особливо агресивні великі іони, які утворюють аква- та гідроксокомплекси, наприклад продукти гідролізу солей заліза чи алюмінію.

Методика визначення якості води на основі інтегрального індикатора – **індексу забруднення води (ІЗВ)** – рекомендована до застосування Державною гідрометеорологічною службою. Вона є одним із найзручніших і доступних способів комплексної оцінки стану водних об'єктів. Обчислення ІЗВ дозволяє порівнювати ступінь забруднення вод різних водойм, незалежно від конкретного складу домішок, а також простежувати динаміку зміни якості води в часі [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**].

Методика включає такі послідовні етапи:

- обчислення середньоарифметичних значень результатів хімічного аналізу для кожного з контрольованих показників;
- розрахунок самого індексу забруднення;
- класифікація води за рівнем її якості;
- представлення та інтерпретація результатів оцінки.

ІЗВ визначається на основі обмеженого переліку показників, до яких належать: феноли, нафтопродукти, нітритний азот, аміачний азот, біохімічна потреба в кисні (БПК) і розчинений кисень. Для кожного з них розраховують середню концентрацію на основі не менше чотирьох (оптимально – шести) аналізів для оцінки гранично допустимої концентрації (ГДК) кожного з них.

Розрахунок ІЗВ базується на співвідношенні концентрацій забруднювальних речовин до відповідних ГДК. Для розрахунків рекомендовано використовувати значення $ГДК_{рг}$ (мг/дм³). Для розчиненого кисню навпаки – ГДК ділиться на отриману середню концентрацію. Розрахунок здійснюється за формулою (1.1) [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**]:

$$ІЗВ = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{ГДК_i}, \quad (1.1)$$

де C_i – усереднена концентрація і-того з шести обраних показників якості води (мг/дм³),

ГДК – відповідне нормативне значення гранично допустимої концентрації для кожного з цих показників.

З метою порівняння екологічного стану води в різних ділянках водного об'єкта, а також для аналізу змін динаміки її якості у часовому розрізі, використовується класифікація водних ресурсів за рівнем забруднення. Як зазначено у [Ошибка! Источник ссылки не найден.], основним критерієм класифікації є числове значення індексу забруднення води, на основі якого здійснюється поділ на відповідні класи:

- **I клас** – дуже чиста вода ($ІЗВ \leq 0,3$);
- **II клас** – чиста вода ($0,3 < ІЗВ \leq 1,0$);
- **III клас** – помірно забруднена ($1,0 < ІЗВ \leq 2,5$);
- **IV клас** – забруднена ($2,5 < ІЗВ \leq 4,0$);
- **V клас** – брудна ($4,0 < ІЗВ \leq 6,0$);
- **VI клас** – дуже брудна ($6,0 < ІЗВ \leq 10,0$);
- **VII клас** – надзвичайно брудна ($ІЗВ > 10,0$).

I клас призначається водам, що мають характеристики максимально наближені до природного стану для певної географічної зони. Їхній хімічний і біологічний склад практично не зазнав змін під впливом антропогенних чинників.

II клас охоплює води, у яких спостерігаються незначні відхилення від природного складу, що, однак, не призводять до помітного порушення екологічного балансу у водній екосистемі.

III клас – води з ознаками помітного антропогенного навантаження. Якість таких вод близька до критичних значень, за яких може початися деградація екосистеми.

IV–VII класи включають води, у яких виявлено значні відхилення від екологічної норми. Ці води характеризуються суттєвими порушеннями фізико-хімічних та біологічних параметрів, а їхній стан розглядається як **екологічна деградація (регресія)**.

Згідно з положеннями [Ошибка! Источник ссылки не найден.], вимоги до якості питної води, що постачається як централізованими, так і нецентралізованими системами, охоплюють 82 параметри, згруповані у 10 категорій:

- перша – 8 мікробіологічних показників;
- друга – 1 показник вірусологічного контролю;
- третя – 2 паразитологічні індикатори;
- четверта – 1 мікологічний параметр;
- п'ята – 4 показники, пов'язані з токсикологічною дією;
- шоста – 2 радіологічні індикатори безпеки;
- сьома – 4 показники, що визначають органолептичну якість води;
- восьма – 17 хімічних компонентів, які впливають на смак, запах і прозорість;
- дев'ята – 30 токсикологічних параметрів безпечності складу (у тому числі: 22 неорганічних, 6 органічних речовин і 2 інтегральних оцінки);
- десята – 13 речовин, що виникають або додаються до води в процесі її обробки.

Нормативне регулювання цих показників здійснюється згідно з вимогами ДСанПіН 2.2.4-171 [Ошибка! Источник ссылки не найден.].

Контроль параметрів якості питної води в централізованих мережах водопостачання виконується відповідно до затверджених регламентів, узгоджених із органами санітарно-епідеміологічного нагляду. При цьому враховуються регіональні природно-кліматичні особливості, екологічна ситуація, а також технологічні аспекти конкретної системи водоочищення.

На підставі положень ДСТУ 4808 [Ошибка! Источник ссылки не найден.] визначається перелік контрольованих показників, встановлюється

частота їхнього вимірювання, а також регламентуються обсяги проб води, що відбираються для аналітичного контролю з поверхневих або підземних джерел.

Відбір, транспортування та зберігання зразків питної води для подальшого аналізу проводяться згідно з процедурами, наведеними у стандартах серії ДСТУ ISO 5667 **[Ошибка! Источник ссылки не найден.Ошибка! Закладка не определена.]**, **[Ошибка! Источник ссылки не найден.]**, **[Ошибка! Источник ссылки не найден.]**. При цьому використовуються лише ті аналітичні методики, які затверджені й виконуються лабораторіями, сертифікованими за вимогами міжнародного стандарту ДСТУ ISO/IEC 17025:2019 **[Ошибка! Источник ссылки не найден.]**.

1.3 Сучасні методи очищення води

Присутність домішок обумовлює такі фізичні властивості води, як каламутність і кольоровість [Ошибка! Источник ссылки не найден.]. **Каламутність** зумовлюється наявністю тонкодисперсних і колоїдних частинок як неорганічного, так і органічного походження. Основними джерелами каламутності поверхневих вод є мул, гідроксиди алюмінію та заліза, силікатна кислота, органічні колоїди, а також мікроорганізми й планктон. У підземних водах каламутність зазвичай пов'язана з наявністю нерозчинних мінеральних домішок.

Кольоровість природних вод головним чином спричинена присутністю гумусових речовин, сполук заліза (III), а також частинок мулу і мікроорганізмів.

Основні джерела забруднення поверхневих вод поділяються на дві категорії: природні та антропогенні [Ошибка! Источник ссылки не найден.]. Природне забруднення виникає внаслідок природних процесів або стихійних явищ, таких як повені, землетруси, ерозія ґрунтів, виверження вулканів чи інші катастрофічні події, що призводять до зміни складу та властивостей гідросфери.

- **Геологічні процеси** – вилуговування мінералів, природна міграція металів і солей, вулканічна активність;
- **Стихійні лиха** – повені, зсуви, землетруси, що спричиняють надходження великої кількості завислих речовин та органіки у водойми;
- **Природне розкладання органіки** – біологічне розпадання рослинних і тваринних залишків, що може спричинити тимчасове зростання біогенних елементів (азоту, фосфору);
- **Атмосферні опади** – дощ, сніг, які можуть вимивати природні забруднювачі з повітря (наприклад, пил, сірка, аміак);
- **Ерозійні процеси** – змив ґрунтів з поверхні суші, який призводить до надходження у воду завислих частинок, гумусу та інших сполук.

Антропогенне (техногенне) забруднення обумовлене впливом людської діяльності, зокрема скиданням промислових і побутових стічних вод, використанням сільськогосподарських хімікатів, урбанізацією та іншими факторами, які змінюють фізико-хімічні характеристики водного середовища.

- **Промислові підприємства** – скидання стічних вод з великим вмістом шкідливих домішок, таких як нафтопродукти, токсичні речовини та важкі метали;
- **Комунально-побутові стоки** – надходження побутових забруднень, детергентів, біогенних елементів та мікроорганізмів;
- **Сільське господарство** – змив з полів залишків пестицидів, гербіцидів, мінеральних добрив, органічних відходів;
- **Транспорт та інфраструктура** – потрапляння дощового змиву з доріг, що містить паливно-мастильні матеріали, метали, пил;
- **Неорганізовані сміттєзвалища та витоки з полігонів** – інфільтрація небезпечних речовин у ґрунтові та поверхневі води;
- **Гірничодобувна промисловість** – забруднення вод кислотами, важкими металами, завислими частинками внаслідок видобутку корисних копалин.

Забруднення водних екосистем, як правило, супроводжується змінами в їх фізико-хімічних параметрах, що негативно впливає на якість води як ресурсу. Особливо небезпечними є важкі метали, які відзначаються високою токсичністю та здатністю негативно впливати на організми водної біоти й людину навіть у малих концентраціях. Інакше їх називають ксенобіотиками – речовинами, що не властиві природним біологічним системам. Їхнє надходження у водойми може викликати як гострі, так і хронічні форми отруєння, порушення метаболізму та генетичні зміни [Ошибка! Источник ссылки не найден.].

Під час оцінювання можливості використання води за різними цільовими напрямками особливо увагу приділяють її хімічному складу, концентраційному рівню домішок, а також стійкості агрегативних форм у

водному середовищі. Сукупність цих параметрів є визначальною для придатності води до споживання.

Як зазначено в [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**], воду класифікують за функціональним призначенням у таких категоріях:

- для побутово-питного водопостачання;
- для виробництва харчових продуктів;
- для аграрного зрошення та інших сільськогосподарських потреб;
- для енергетичних систем, зокрема парових установок;
- для охолодження промислового обладнання;
- для технологічних процесів у виробництві;
- для потреб нафтовидобутку, зокрема заводнення пластів.

При цьому основними критеріями, що регламентують якість води для кожної з цих сфер, є наявність певних типів домішок, їхня хімічна специфіка та концентраційний рівень [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**].

Так, екологічне оцінювання стану річкових басейнів ґрунтується на принципах екосистемного підходу, в якому вода розглядається як складова частина функціональної цілісності водного середовища. Така оцінка включає систематизацію за сольовим складом, специфічними тропосапробіологічними показниками, а також за рівнем токсичного та радіологічного навантаження. У межах кожної з цих класифікацій водні екосистеми поділяються на три категорії якості: добру, задовільну та незадовільну [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**].

До вод із *хорошим станом* належать ті, що зазнають мінімального антропогенного впливу і характеризуються фізико-хімічними та біологічними параметрами, близькими до природного фону регіону.

Задовільний стан притаманний водоймам, що піддаються суттєвому антропогенному навантаженню, але ще зберігають здатність до саморегуляції в межах екологічної стійкості.

До категорії *забрудненого стану* належать води, у яких спостерігаються значні відхилення екологічних показників, що свідчить про наявність процесів деградації на різних етапах їх розвитку.

Як зазначено у джерелі [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**], методика екологічної оцінки якості вод річкових екосистем ґрунтується на використанні трьох ключових факторних індексів:

Індекс А характеризує рівень мінералізації (мінеральний склад),

Індекс В – трофо-сапробіологічні показники, які відображають ступінь органічного забруднення,

Індекс С – інтенсивність впливу речовин, що мають специфічну біоцидну активність.

Кожен індекс формується на основі порівняння фактичних значень відповідних параметрів із нормативними значеннями, встановленими для вод високої якості, що використовуються як еталон.

Зведений (інтегральний) екологічний індекс Е розраховується як середнє арифметичне значення трьох окремих індексів – А, В та С. Отримане значення дає змогу охарактеризувати загальний екологічний стан водойми. Інтерпретація індексу Е подається за такими межами:

- **1,0** – еталонний, тобто практично незабруднений стан;
- **1,1–3,0** – добрий стан водного середовища;
- **3,1–8,0** – задовільний рівень якості;
- **8,1–13,0** – перехідний стан, що свідчить про тенденцію до погіршення;
- **понад 13,0** – критичний (поганий) екологічний стан.

В Україні, особливо в наш час проблем з водопостачанням, впроваджено комплексну систему підготовки води, яка забезпечує її відповідність встановленим нормативам якості. Ця система базується на поетапному очищенні, при якому використовуються різні методи, обрані з урахуванням джерела водопостачання та типу забруднень. Типова технологічна схема

очищення згідно з [Ошибка! Источник ссылки не найден.] включає такі основні процеси:

1. **Первинне відстоювання** – здійснюється з використанням або без використання реагентів залежно від характеристик вихідної води. На цьому етапі видаляються великі механічні частки шляхом осадження.

2. **Коагуляція** – полягає у додаванні коагулянтів (наприклад, солей алюмінію, заліза або полімерних реагентів), що сприяють утворенню агрегатів з дрібнодисперсних і колоїдних домішок, які потім можуть бути легко видалені (часто супроводжується флокуляцією – додавання флокулянтів (полімерів), що утворюють мости між утвореними агрегатами, даючи можливість простіше відфільтрувати частинки більшого розміру).

3. **Механічна фільтрація** – передбачає пропускання води через фільтрувальні матеріали з метою видалення залишкових зважених частинок після коагуляційного етапу.

4. **Знезараження** – є завершальним етапом технології та забезпечує знищення патогенних мікроорганізмів, тим самим гарантуючи мікробіологічну безпеку води.

Вибір технологічних рішень з підготовки води до очищення до певного рівня визначається її хімічним складом, функціональним призначенням, а також сукупністю фізичних, хімічних та мікробіологічних показників, які встановлюються відповідно до потреб користувача. Значного впливу на структуру водоочисного процесу надають сезонні коливання якісних характеристик води у джерелі водозабору, а також наявність потенційних забруднень, пов'язаних із впливом побутових або промислових скидів.

Визначальним етапом у підборі технологічної схеми водопідготовки є зіставлення аналітичних характеристик вихідної води, отриманих у результаті хімічного та технологічного моніторингу, з гранично допустимими значеннями, що регламентовані чинними державними стандартами на питну воду [Ошибка! Источник ссылки не найден.], [Ошибка! Источник ссылки не найден.] або технічними умовами, діючими в конкретному регіоні.

Методи підготовки води поділяють на три основні категорії:

- покращення органолептичних властивостей (усунення мутності, кольоровості, запаху та присмаку);
- забезпечення санітарно-епідеміологічної безпеки (дезінфекція шляхом хлорування, озонування, ультрафіолетового чи радіаційного опромінення, УЗ-обробки та інших методів);
- коригування мінерального складу (наприклад, фторування, знефторення, знезалізнення, зниження вмісту марганцю, пом'якшення води або її знесолення).

Ключовими етапами покращення якості води для господарсько-питного використання є її освітлення, знебарвлення та знезараження.

Освітлення води – процес вилучення з води завислих твердих домішок. Залежно від допустимого кінцевого вмісту завислих речовин, освітлення реалізують через осадження у відстійниках, обробку в гідроциклонах, центрифугування, флотацію, фільтрацію, або пропускання води крізь шар раніше осаджених часток у прояснювальних пристроях різних типів [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**].

Для прискорення процесу видалення завислих речовин часто застосовують коагуляцію – введення до води спеціальних хімічних реагентів (коагулянтів). Ці речовини сприяють агрегації колоїдних частинок шляхом їх взаємодії та злипанню під час випадкових зіткнень, обумовлених тепловим рухом молекул. Ці агрегати ефективно сорбують на своїй поверхні домішки та завислі частинки, що швидко осідають під впливом сили тяжіння. Коагуляція зазвичай відбувається у прояснювачах із завислим шаром пластівців або у контактних прояснювачах, які містять нерухомий зернистий наповнювач.

Для виділення грубодисперсних включень застосовують методи механічного поділу – гідроциклони, центрифуги, після яких використовують швидкі фільтри, мікрофільтри, сітки або тканинні фільтрувальні матеріали. У деяких випадках освітлення води поєднується зі знебарвленням у флотаторах [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**].

Знебарвлення води передбачає усунення розчинених речовин або колоїдних часток, що надають воді забарвлення. Цей процес здійснюється за допомогою коагуляції, флотації, а також із застосуванням окиснювальних або сорбційних методів. Для цього широко використовують хлорування, фільтрацію крізь гранульоване активоване вугілля, а також напірну флотацію з попередньою коагуляцією.

Знезалізнєння води має на меті зниження концентрації залізовмісних сполук до рівнів, передбачених державними нормативами для питної води або технічними регламентами споживача. Залежно від хімічної форми феруму у воді, застосовують або безреагентні, або реагентні методи. Найбільш поширеним є аерування води з наступною фільтрацією на швидких фільтрах.

Фторування води проводиться шляхом додавання фторвмісних сполук з метою профілактики карієсу зубів. Введення реагенту здійснюється до або після фільтрації на швидких фільтрах.

Знезараження води спрямоване на знищення патогенних мікроорганізмів – бактерій і вірусів. Для цього застосовують хлорування, озонування або обробку перманганатом калію.

Крім наведених методів, для досягнення нормативної якості питної води можуть додатково використовуватись такі процеси, як дезодорація (усунення запахів і присмаків шляхом аерації, сорбції чи окиснення), хімічне пом'якшення (введення лужних реагентів з наступним осадженням солей твердості) та опріснення (для зменшення загального вмісту розчинених солей) **[Ошибка! Источник ссылки не найден.]**.

Процес очищення води включає сукупність заходів, спрямованих на усунення або нейтралізацію шкідливих домішок. За механізмом впливу методи очистки поділяють на кілька основних типів: механічні, фізичні, хімічні, фізико-механічні, фізико-хімічні та біохімічні **[Ошибка! Источник ссылки не найден.]**. У разі застосування одночасно декількох методів для досягнення заданого рівня очищення, такий підхід класифікують як комбіноване або

комплексне очищення і дезінфекцію вод. Приклад класифікації сучасних методів очищення наведено нижче (рис. 1.1):

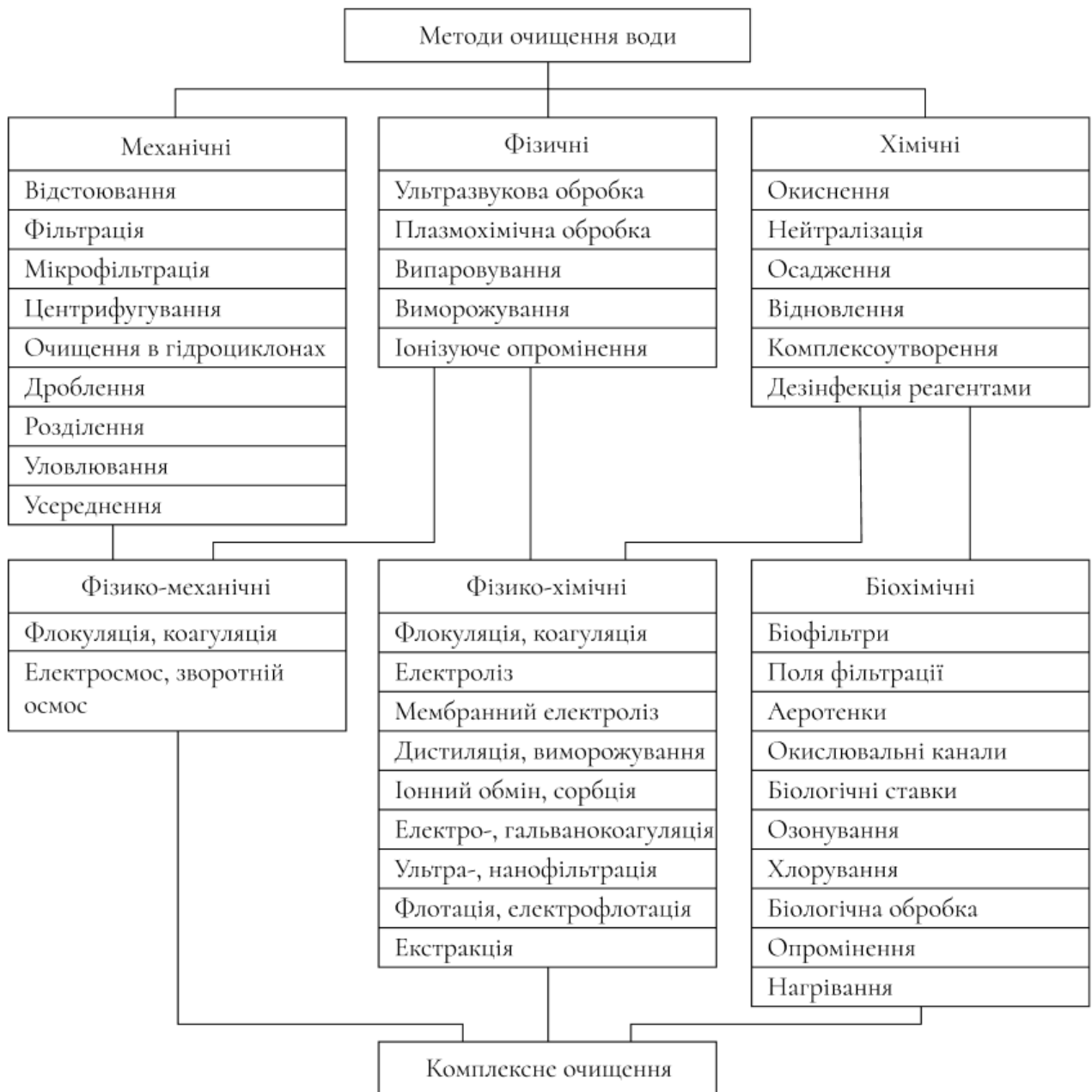


Рис. 1.1 – Сучасна класифікація методів очищення природних і стічних вод

Висновки

Перший розділ присвячено проведенню систематизованого огляду властивостей води як природного багатокомпонентного середовища. Розглянуто фізичні, хімічні та біологічні характеристики води, визначено основні показники, що впливають на її якість. Встановлено, що наявність розчинених органічних та неорганічних домішок, біологічних агентів (бактерій, вірусів, водоростей), а також зважених частинок значно погіршує властивості води та створює потенційну загрозу для здоров'я людини та функціонування технічних систем.

Класифіковано основні джерела забруднення водних ресурсів – побутові, промислові, сільськогосподарські та природні. Проведено аналіз типів домішок за агрегатним станом, хімічною природою, походженням і способом зв'язування з водним середовищем.

Окрему увагу приділено класифікації частинок у воді (колоїдні, грубодисперсні, розчинені), що має значення при виборі технологій очищення. Узагальнено традиційні та сучасні методи водоочищення: механічні, хімічні, фізико-хімічні, біологічні та фізичні. Показано, що з-поміж фізичних методів найбільш перспективними є ті, що базуються на енергетичних впливах – зокрема ультразвукове очищення, завдяки поєднанню знезаражувальної ефективності та відсутності вторинного хімічного забруднення.

2. УЛЬТРАЗВУКОВІ ХВИЛІ ТА ЇХ ВИКОРИСТАННЯ

Ультразвукові хвилі представляють собою механічні коливання пружного типу з частотою, що перевищує межі людського слуху (більше 20 кГц). Вони здатні поширюватися у твердих тілах, рідинах та газах, змінюючи фізичні властивості середовища та викликаючи різні ефекти, які мають велике значення як у наукових дослідженнях, так і в практичних застосуваннях. Завдяки здатності концентрувати енергію в обмежених об'ємах, ультразвук активно використовується в технічних, медичних та екологічних галузях.

Такий тип хвиль застосовується для діагностики, контролю якості матеріалів, інтенсифікації хімічних процесів, стерилізації та очищення. У медицині ультразвук слугує основою для неінвазивної візуалізації внутрішніх органів. У промисловості – для контролю дефектів у металах та зварних швах, а також для прискорення реакцій у хімічному виробництві. В екологічних технологіях, зокрема у водоочищенні, ультразвук застосовується як ефективний засіб для знезараження та руйнування органічних забруднень.

У цьому розділі представлено загальні характеристики ультразвукових хвиль, описано базові принципи їх генерації та розповсюдження, а також наведено приклади їх використання в різних галузях людської діяльності. Особлива увага приділяється процесам, які стоять за їх виникненням та поширенням в різноманітних середовищах.

2.1 Основні теоретичні відомості про фізичні властивості ультразвукових хвиль

Ультразвукові хвилі являють собою пружні механічні коливання з частотою вище 20 кГц. Вони можуть поширюватися у різноманітних середовищах – твердих, рідких та газоподібних – і вирізняються низкою специфічних фізичних властивостей, таких як висока спрямованість, можливість локалізованої дії та здатність проникати в матеріали без їх руйнування.

Ультразвук відіграє важливу роль у сучасних науці та техніці. Приклади його використання можна відстежити в багатьох галузях: медицині, матеріалознавстві, екології, харчовій промисловості, безконтактній діагностиці, а також технології очищення та обробки речовин.

Класифікація за частотним діапазоном визначає специфіку їх використання:

- *Низькочастотний* ультразвук (20–100 кГц) часто застосовують для очищення, зварювання та дезінтеграції;
- *Середньочастотний* (100 кГц – 1 МГц) – у процесах контролю якості та обробки матеріалів;
- *Високочастотний і надвисокочастотний* (1–10 МГц) – у медицині для діагностики (наприклад, УЗД), а також у дефектоскопії та дослідженнях структури речовин.

Таким чином, вивчення фізичних властивостей ультразвукових хвиль є основою для розуміння принципів їх дії та ефективного використання в науці й техніці.

2.1.1 Класифікація коливань

Коливання являють собою процес зміни стану системи відносно її положення рівноваги, який певною мірою повторюється з часом. Коливання у фізичних системах майже завжди пов'язані з перетвореннями енергії з одного вигляду на інший та в зворотному напрямі [11].

Положення рівноваги – це таке положення тіла у просторі, при якому воно може залишатися нерухомим необмежено довгий час, що узгоджується з першим законом Ньютона про збереження стану спокою.

Колівальна система – це система, в якій одне або кілька тіл здатні здійснювати колівальні рухи. У фізичних системах колівальні процеси зазвичай супроводжуються постійним перетворенням енергії з одного виду в інший і навпаки.

За способом збудження коливання поділяються на кілька типів:

- **Вільні коливання** виникають у системах, ізольованих від зовнішніх впливів, після одноразового зовнішнього збурення. Подальший рух зумовлений лише внутрішніми силами та особливостями будови системи. Уся енергія вноситься одноразово під час початкового збудження. *Власні коливання* ж відбуваються в ідеальному середовищі без опору.

- **Вимушені коливання** виникають під впливом зовнішніх сил, які діють незалежно від внутрішнього стану системи. Їхній характер залежить як від внутрішніх властивостей системи, так і від зовнішнього збудження, через яке постійно надходить енергія. Енергія в систему поступає через зовнішню силу.

- **Параметричні коливання** зумовлені періодичними змінами параметрів самої системи – наприклад, довжини маятника чи електричних характеристик (ємності, індуктивності контуру). Енергія подається ззовні, і залежно від фазових співвідношень, зовнішня сила може або підсилювати (збільшуючи амплітуду), або послаблювати коливання (зменшуючи амплітуду).

- **Автоколивання** виникають у системах, які здатні самостійно регулювати подачу енергії від постійного джерела з метою компенсації втрат. Такі

коливання мають нелінійний, квазіперіодичний характер і з'являються внаслідок самозбудження, без зовнішнього коливального впливу. Їхні особливості визначаються структурою самої системи, джерелом живлення та механізмом зворотного зв'язку.

Колівальні процеси можуть бути *періодичними* і *неперіодичними*.

Періодичні коливання – це такий коливальний рух, при якому будь-яке значення величини $x(t)$ повторюється через однакові проміжки часу T [11]:

$$x(t + T) = x(t) . \quad (2.1)$$

Період коливань T – це проміжок часу, за який здійснюється одне повне коливання. Вимірюється він у секундах (с).

Частота коливань ν є величиною, оберненою до періоду, і показує кількість коливань, що відбуваються за одиницю часу, тобто $\nu = 1/T$. Одиницею частоти є герц (Гц), де 1 Гц = 1 коливанню за секунду. На практиці часто застосовують кратні одиниці – кілогерци (10^3 Гц) та мегагерци (10^6 Гц).

Циклічна частота ω визначає кількість коливань, які відбуваються за інтервал часу, рівний 2π секунд, і обчислюється за формулою:

$$\omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{T} . \quad (2.2)$$

Амплітуда A – це найбільше відхилення коливної величини від її положення рівноваги. Наприклад, у механічних коливаннях — це максимальна відстань, на яку зміщується тіло, що коливається: $A = x_{\max}$.

Фаза коливань – це аргумент гармонічної функції, яка описує коливальний процес; її позначають як $\varphi = \omega t$. Фаза визначає поточний стан коливань у даний момент часу і вимірюється в радіанах (рад).

Неперіодичні коливання – це коливальні процеси, значення яких $x(t_0)$ не повторюється через сталий проміжок часу T , на відміну від періодичних коливань. Вони можуть бути описані узагальненою формулою:

$$x = x_0(t) \sin(\omega t + \varphi(t)) , \quad (2.3)$$

де $x(t_0)$ – змінна в часі амплітуда,

$\varphi(t)$ – змінна фаза.

Типовими прикладами неперіодичних коливань є *загасаючі коливання* та *биття*, які виникають при суперпозиції двох або більше гармонічних сигналів з різними частотами, амплітудами або фазами.

Згідно з джерелом [11], однією з ключових характеристик коливальної системи є *добротність*, яка визначає, наскільки ефективно система зберігає енергію. Вона розраховується за формулою:

$$Q = \frac{2\pi E_0}{E_{\pi}}, \quad (2.4)$$

де E_0 – енергія, накопичена в системі,

E_{π} – енергія, що втрачається за один повний період коливань.

Добротність є показником резонансних властивостей системи: чим вищий її рівень, тим менші енергетичні втрати в кожному циклі, тим повільніше згасають коливання та виразнішим є резонанс. Вона також показує, у скільки разів амплітуда вимушених гармонічних коливань при резонансі перевищує амплітуду при нерезонансних частотах за однакової дії збуджувальної сили [11].

Серед усіх періодичних коливань особливе значення мають *гармонічні коливання*, які відбуваються за синусоїдальним або косинусоїдальним законом зміни коливної величини x з часом:

$$x(t) = A \sin(\omega_0 t + \alpha), \quad (2.5)$$

або

$$x(t) = A \cos(\omega_0 t + \alpha). \quad (2.6)$$

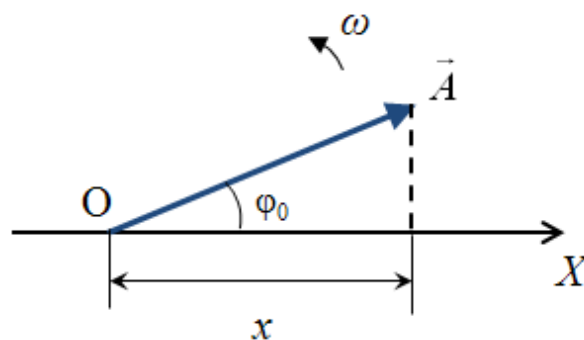


Рис. 2.1 – Зображення гармонічних коливань у вигляді векторної діаграми [11]

Відповідно до формули Ейлера, для комплексного експоненціального виразу справедливе таке співвідношення:

$$e^{i\varphi} = \cos \varphi + i \cdot \sin \varphi , \quad (2.7)$$

де $i = \sqrt{-1}$ – уявна одиниця.

Завдяки цьому рівняння гармонічного коливання може бути записане в узагальненій комплексній експоненційній формі:

$$\tilde{x} = A \cdot e^{i(\omega t + \varphi_0)} , \quad (2.8)$$

де \tilde{x} – комплексне подання коливного процесу.

Фізичний зміст має лише *дійсна частина* цієї функції, що й відповідає реальному гармонічному коливанню:

$$\text{Re}(\tilde{x}) = A \cdot \sin(\omega t + \varphi_0) . \quad (2.9)$$

Швидкість тіла, що здійснює коливання, визначається як перша похідна від зміщення за часом [11]:

$$v = x' = \frac{dx}{dt} = A\omega \cdot \cos(\omega t + \varphi_0) = v_m \cdot \cos(\omega t + \varphi_0) \quad (2.10)$$

де $v_m = A\omega$ – максимальна швидкість тіла.

Прискорення визначається як перша похідна від швидкості або друга похідна від зміщення:

$$a = v' = x'' = -A\omega^2 \cdot \sin(\omega t + \varphi_0) = -a_m \cdot \sin(\omega t + \varphi_0) , \quad (2.11)$$

де $a_m = A\omega^2$ – максимальне значення прискорення.

Наявність від'ємного знака у формулі (2.11) вказує на те, що прискорення завжди спрямоване протилежно до зміщення, тобто діє у напрямку повернення тіла до положення рівноваги. Фазовий зсув між коливаннями швидкості та прискорення становить $\pi/2$ (90°), що означає: у ті моменти, коли швидкість досягає максимуму, прискорення наближається до нуля – такий же процес відбувається і в сторонньому напрямку, коли зміщення проходить через точку рівноваги з максимальним прискоренням.

Сила, яка діє на тіло під час коливального руху, є пропорційною до його зміщення від положення рівноваги і спрямована в протилежному напрямку – тобто в бік відновлення рівноважного стану [11]:

$$F_{max} = ma_m = -mA\omega^2. \quad (2.12)$$

Існує також окремий тип коливань – **ангармонічні коливання**, що відрізняються від гармонічних тим, що описуються нелінійними диференціальними рівняннями. Їх амплітуда зазвичай є дуже великою. Такі коливання можна уявити як поєднання багатьох гармонічних коливань із частотами, кратними найнижчій основній частоті. У цьому випадку амплітуда й частота не залишаються постійними, а змінюються з часом, при цьому виникають вищі гармоніки основної частоти.

У випадку **механічних коливань** змінною, що періодично змінюється в часі, виступає **відхилення системи** (матеріальної точки, сукупності точок або тіла) від положення рівноваги. Це відхилення описується функцією $x(t)$, яка задає координату коливального об'єкта в момент часу t . Положенням рівноваги вважається стан, за якого тіло перебуває у спокої за відсутності зовнішніх збурень, тобто $x = 0$.

Механічні коливання – це форма механічного руху, що виникає внаслідок дії механічних сил і характеризується періодичним повторенням стану системи. Інакше кажучи, це рух тіла (або матеріальної точки), за якого воно багаторазово повертається в одне й те саме положення в просторі [11].

Електромагнітні коливання – це процес поширення електромагнітної взаємодії у просторі у вигляді змінного електричного та магнітного полів, які взаємно зумовлюють одне одного. Цим терміном також позначають явища в електричних колах, коли спостерігається багаторазова періодична зміна сили струму, його напрямку, а також значення та полярності напруги на окремих елементах кола.

Особливим різновидом коливального руху є **лімітаційний рух**, також відомий як **аперіодичні коливання**. У такому випадку, якщо систему вивести зі стану рівноваги й залишити без подальшого впливу, вона повертатиметься до рівноважного положення без здійснення жодного повного коливального циклу. Прикладом таких коливань є сильно загасаючі процеси, для яких декремент загасання β перевищує циклічну частоту ω : $\beta > \omega$.

Нижче наведені приклади коливань за їхньою формою:

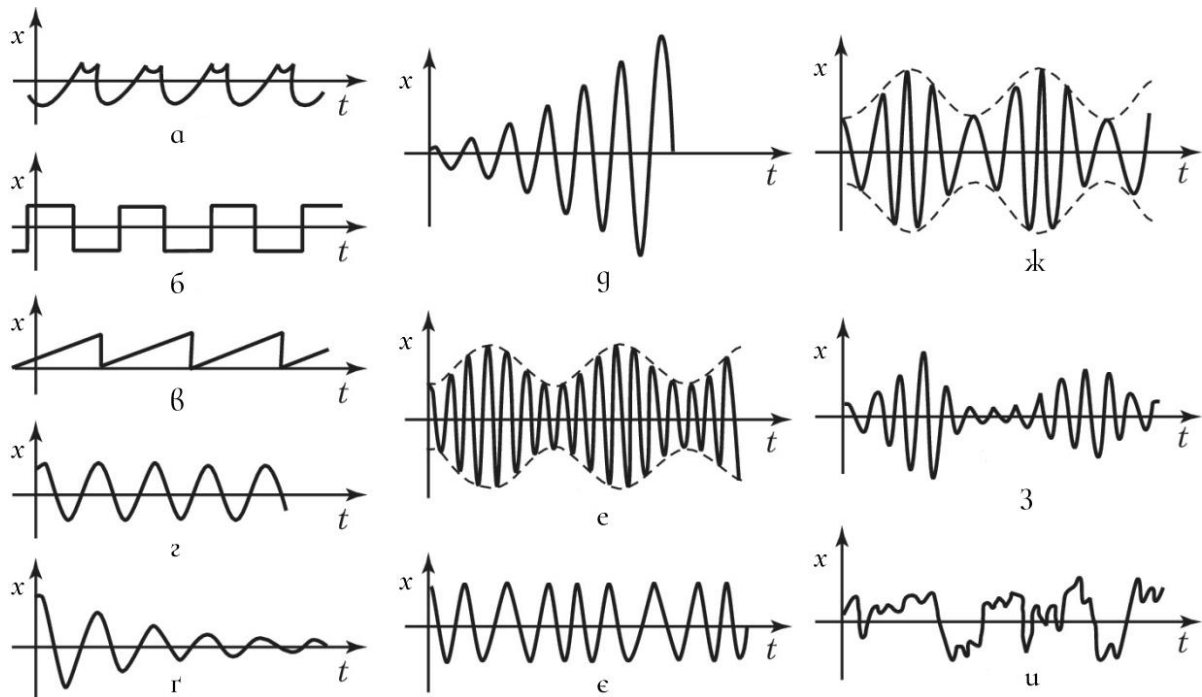


Рис. 2.2 – Різновиди коливань за формою: а – складної форми; б – прямокутні; в – пилкоподібні; г – синусоїдальні (гармонічні); г – затухаючі; д – наростаючі; е – амплітудно-модульовані (АМ); є – частотно-модульовані (FM); ж – амплітудно- і частотно-модульовані; з – амплітуда і фаза випадкові; и – безладні (шум)

Під час дослідження коливального руху основну увагу звертають на пошук характеристик, що описують його повторюваність у часі, зокрема:

1. Правило або математичний закон, за яким змінюється стан системи з часом;
2. Інтервал часу, після якого система знову опиняється в тому самому стані – *період коливань*;
3. Максимальне значення відхилення змінної величини від нульового рівня – *амплітуда*.

2.1.2 Характеристики ультразвукових хвиль

Коливання, що виникають у певній точці середовища, не залишаються лише в місці їхнього збудження – вони передаються далі через середовище з обмеженою (скінченною) швидкістю. Таке поширення відбувається завдяки взаємодії між частинками середовища. Якщо ця взаємодія здійснюється силами пружності, які виникають внаслідок деформацій під час передавання коливань між частинками, такі хвилі називають *пружними*. Прикладами є звукові, сейсмічні та інші типи хвиль.

Хвиля – явище зміни рівноважного стану речовини чи поля (збурень), що поширюються в просторі з перебігом часу. Іншими словами, хвиля – процес поширення коливань у просторі з часом.

Пружна хвиля – це форма механічного збурення (деформації), що поширюється в середовищі, здатному до пружного відновлення після дії зовнішніх сил. У процесі її розповсюдження частинки середовища здійснюють коливальні рухи навколо положення рівноваги, передаючи енергію наступним частинкам через пружні взаємодії.

Пружним середовищем називають середовище, у якому будь-який об'єм має здатність повертатися до початкового стану після припинення дії зовнішніх сил, що спричинили деформацію. *Пружність* – це властивість тіл або частин середовища відновлювати свою форму після припинення дії деформуючих сил [11].

Відповідно до [11], при пружних деформаціях виникають пружні або квазіпружні сили. *Пружними* силами називають ті, що виникають у тілі під час його пружної деформації (наприклад, при стисканні або розтягуванні) і мають тенденцію відновити початкову форму або положення тіла. Сила пружності описується законом Гука:

$$F_{\text{пр}} = -kx . \quad (2.13)$$

У випадках, коли сила за фізичною природою не є пружною, але математично підкоряється цьому ж закону, її прийнято називати *квазіпружною*.

Повна механічна енергія тіла, що коливається під дією пружних або квазіпружних сил, визначається як сума кінетичної E_k та потенціальної E_p енергій і виражається рівнянням [11]:

$$E = E_k + E_p = \frac{m \cdot v^2}{2} + \frac{k \cdot x^2}{2}, \quad (2.14)$$

де m – маса тіла, що коливається,

k – коефіцієнт жорсткості,

x – поточне відхилення тіла,

v – швидкість при поточному положенні тіла.

У закритій (ідеалізованій) системі, де відсутні сили тертя або опору, відбувається періодичне перетворення потенціальної енергії в кінетичну і навпаки. При цьому повна механічна енергія є константною відповідно до закону збереження енергії. У точці максимального зміщення від положення рівноваги вся енергія має потенціальну форму, а в положенні рівноваги – кінетичну [11]:

$$E = \frac{m \cdot v_M^2}{2} + \frac{k \cdot A^2}{2}, \quad (2.15)$$

де A – максимальне зміщення (амплітуда),

v_M – максимальна швидкість у момент проходження положення рівноваги.

У відповідності до [11], основні параметри, які характеризують пружну хвилю:

- частота f ,
- період T ,
- амплітуда A ,
- швидкість поширення C ,
- довжина хвилі λ ,
- фаза φ .

Основними параметрами, що характеризують пружну хвилю є: частота f , період T , амплітуда A , швидкість поширення C , довжина хвилі λ та фаза φ .

Довжина хвилі λ – це просторовий інтервал між двома точками хвилі, що коливаються в одній і тій самій фазі (синфазно). Вона визначається як:

$$\lambda = \frac{C}{f}, \quad (2.16)$$

де C – швидкість поширення хвилі, f – її частота.

Фаза хвилі φ – величина, яка вказує на поточний стан коливального процесу в межах одного періоду та визначає, яку частину циклу вже пройдено [11].

Найпростіша форма гармонічної пружної хвилі, що поширюється в одновимірному середовищі, описується рівнянням:

$$\xi(x, t) = A \cdot \sin \left[\omega \left(t - \frac{x}{C} \right) \right], \quad (2.17)$$

де $\xi(x, t)$ – миттєве зміщення частинки, розташованої в точці з координатою x у момент часу t ,

A – амплітуда хвилі,

ω – циклічна частота ($\omega = 2\pi f$),

C – швидкість поширення хвилі.

Рівняння (2.17) описує плоску гармонічну хвилю, що поширюється в додатному напрямку осі X . Оскільки хвиля є явищем, яке залежить як від простору, так і від часу, її аналіз зручно проводити в одному з двох характерних режимів: у фіксованій точці простору або у фіксований момент часу [11].

1.) Аналіз у фіксованій точці простору ($x_0 = \text{const}$):

У цьому випадку координата простору стала, а зміщення частинки змінюється в часі. Вираз (2.17) набуває вигляду:

$$\xi(t) = A \cdot \sin(\omega t - \varphi_0). \quad (2.18)$$

де $\varphi_0 = \omega x_0 / C$ – початкова фаза коливання у точці x_0 .

Таким чином, рівняння (2.18) описує гармонічне коливання окремої частинки середовища, що розташована в точці x_0 . Ці коливання є періодичними

у часі з періодом $T = 1/f$, що визначає інтервал часу між двома однаковими фазовими станами частинки.

2.) Аналіз у фіксований момент часу ($t_0 = \text{const}$):

У цьому випадку фіксується час, а зміщення залежить від просторової координати X [11]. Вираз (2.17) тоді набуває форми:

$$\xi(x) = A \cdot \sin \left[\omega \left(t_0 - \frac{x}{c} \right) \right]. \quad (2.19)$$

Даний вираз описує просторову структуру хвилі в заданий момент часу t_0 . Коливальний процес у цьому випадку є періодичним відносно координати X , і для його опису вводиться поняття **довжини хвилі** λ . Вона визначається як відстань між двома найближчими точками хвилі, що перебувають в однаковій фазі:

$$\lambda = c \cdot T. \quad (2.20)$$

де c – швидкість поширення хвилі,

T – період коливань.

Напрямок поширення хвилі називається **променем**. Залежно від взаємної орієнтації коливального руху частинок середовища та вектора напрямку хвильового фронту, розрізняють декілька типів хвиль: **поздовжні**, **поперечні (зсувні)**, **поверхневі** та **нормальні**.

Якщо вектор зміщення частинок середовища спрямований уздовж напрямку поширення хвилі, така хвиля класифікується як **поздовжня**. Подібні хвилі можуть розповсюджуватися у будь-якому агрегатному стані речовини: газоподібному, рідкому або твердому.

У випадку, коли коливання частинок відбуваються у напрямку, перпендикулярному до напрямку розповсюдження хвилі, говорять про **поперечну хвилю**. Такий тип хвиль можливий лише в твердих тілах, оскільки лише вони мають здатність чинити пружний опір деформаціям зсуву.

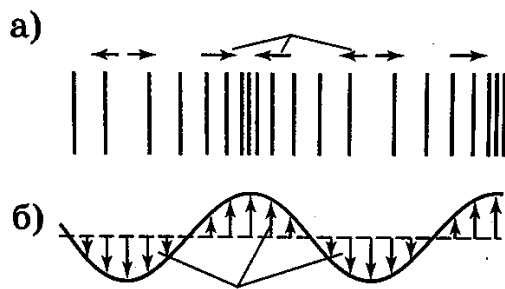


Рис. 2.3 – Поздовжні (а) та поперечні (б) хвилі

На вільній поверхні твердого середовища можуть виникати так звані *поверхневі хвилі Релея*, для яких характерний еліптичний характер руху частинок середовища. Амплітуда цих коливань експоненційно спадає зі збільшенням глибини, тому основна енергія хвилі зосереджена в поверхневому шарі товщиною приблизно $1 \dots 1,5$ довжини хвилі (λ).

У тілах обмеженої товщини (наприклад, у листах, тонких пластинах або дротах) можуть формуватись так звані *нормальні хвилі*, або *хвилі Лемба*. Вони є результатом складного процесу взаємодії поздовжніх і поперечних хвиль у межах геометрично обмеженого простору. Такі хвилі є характерними для ультразвукової діагностики та неруйнівного контролю, оскільки забезпечують ефективне поширення коливань в тонких структурах.

У ізотропних (однорідних за напрямками) твердих тілах швидкість поширення хвиль залежить не лише від типу хвилі, а й від механічних властивостей середовища – зокрема, від модулів пружності та густини – а також від геометрії об'єкта.

Передавання збурення між частинками середовища відбувається з певною швидкістю, що називається *фазовою швидкістю*. Вона характеризує швидкість переміщення фази коливань у просторі [Ошибка! Источник ссылки не найден.].

Хвильовою поверхнею називають геометричне місце точок середовища, які на певний момент часу мають однакову фазу коливань. Дотична площина до хвильової поверхні визначає *фронт хвилі*, форма якого може бути *плоскою*,

сферичною або *циліндричною*, залежно від умов збудження та розповсюдження хвилі.

Залежність між параметрами хвилі описується за швидкістю через такі співвідношення:

$$v = \frac{c}{T}, v = \lambda \vartheta, \quad (2.21)$$

де λ – довжина хвилі;

T – період коливань;

ϑ – частота коливань.

Швидкість поширення хвиль також може бути виражена через пружні властивості середовища. Для *поздовжніх хвиль* вона обчислюється як:

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (2.22)$$

а для *поперечних (зсувних) хвиль*:

$$v = \sqrt{\frac{G}{\rho}}. \quad (2.23)$$

де ρ – густина середовища;

E – модуль Юнга;

G – модуль зсуву (модуль зсувної жорсткості).

Пружні хвилі, які поширюються у безперервних середовищах, прийнято називати *звуковими хвилями* [11]. До цієї категорії належать коливання, частотний діапазон яких відповідає чутливості слухового апарату людини. Типовий діапазон сприйняття людського слуху становить від 16 Гц до 20 000 Гц. Хвилі з частотами, нижчими за 16 Гц, називають *інфразвуковими*, а коливання з частотами в межах $2 \cdot 10^4$ до $1 \cdot 10^9$ Гц класифікуються як *ультразвукові* (рис. 2.4).

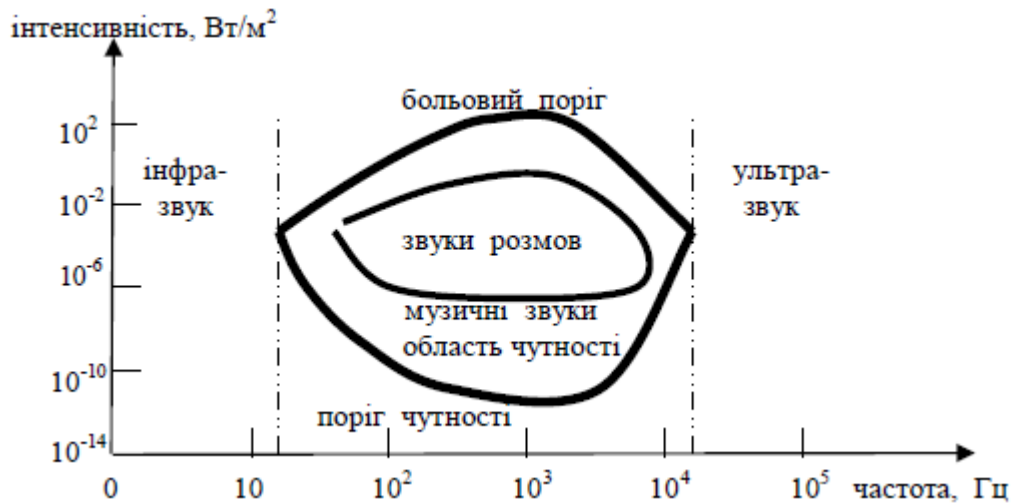


Рис. 2.4 – Звукові хвилі

Акустика – це галузь фізики, що займається дослідженням звукових хвиль. Джерелом звуку завжди є тіло, яке коливається, і внаслідок цих коливань створює механічні хвилі в повітряному середовищі. Ці хвилі є *поздовжніми* та представляють собою чергування областей *стиснення* та *розрідження* повітря, що розходяться у всі сторони від джерела.

Простір, у якому поширюються пружні хвилі, формує *акустичне поле*. Його фізичні характеристики описуються такими величинами, як:

- *акустичний тиск* P ,
- *швидкість коливань частинок середовища* v ,
- *густина середовища* ρ ,
- *температура* T .

Одним із ключових параметрів у теорії хвиль є *питомий акустичний імпеданс* (або *питомий хвильовий опір*), що визначається як відношення тиску звукової хвилі до відповідної коливальної швидкості [11]:

$$z_{\text{п}} = \frac{P}{v}. \quad (2.24)$$

У загальному випадку, коли хвиля має складну структуру (наприклад, у неоднорідному чи обмеженому середовищі), $z_{\text{п}}$ є *комплексною величиною*, оскільки між тиском і швидкістю може існувати *фазовий зсув*, що залежить як від координат у просторі, так і від характеристик хвильового процесу.

Проте у випадку *плоскої монохроматичної хвилі*, яка поширюється без відбиттів у напрямку руху, тиск і швидкість коливань перебувають у фазі, тому питомий імпеданс має *реальне значення*, сталий у просторі та часі.

У такому випадку застосовується поняття *акустичного імпедансу середовища* – величини, яка залежить виключно від його фізичних характеристик [11]:

$$z = \rho \cdot C, \quad (2.25)$$

де ρ – середня густина речовини,

C – швидкість розповсюдження звукових хвиль у середовищі.

У випадку *ідеальної плоскої акустичної хвилі*, що не зазнає енергетичних втрат під час розповсюдження, *питомий акустичний імпеданс* z_{Π} збігається із *середовищним акустичним імпедансом* z . За цих умов справджується наступне співвідношення між *акустичним тиском*, *коливальною швидкістю частинок середовища*, *густиною речовини* та *швидкістю звуку*:

$$\frac{P}{v} = \rho \cdot C. \quad (2.26)$$

Оскільки *амплітуда коливальної швидкості* пов'язана з *амплітудою зміщення* як $v = \omega A$, то залежність між *акустичним тиском* P і *амплітудою зсуву* A для ідеальної плоскої хвилі має вигляд [11]:

$$P = \rho C v = \rho C \omega A = 2\pi f \rho C A = z \omega A. \quad (2.27)$$

Поширення акустичних хвиль супроводжується передачею енергії від джерела до середовища. При цьому частинки речовини здійснюють зворотно-поступальні коливання навколо положення рівноваги, не змінюючи свого середнього положення у просторі. Внаслідок цього відбувається передавання енергії без перенесення маси.

Ця енергія поділяється на:

- *кінетичну енергію* руху частинок;
- *потенціальну енергію* деформації середовища.

Загальна *енергія однієї коливальної частинки* E у разі гармонічних коливань описується виразом:

$$E = \frac{m \cdot v^2}{2} = \frac{mA^2 \cdot \omega^2}{2}, \quad (2.28)$$

де m – маса частинки, що коливається,

A – амплітуда зміщення,

ω – циклічна частота.

Для переходу до об'ємної характеристики використовують *густину акустичної енергії* (Дж/м³) – енергію, що припадає на одиницю об'єму середовища [11]:

$$W = \frac{E}{V}, \quad (2.29)$$

де V – відповідний об'єм, у якому відбуваються коливання.

Для *гармонічної плоскої хвилі*, що поширюється в одному напрямку, *густина повної енергії* у просторі та часі дорівнює сумі кінетичної W_k та потенціальної W_p компонент:

$$W(x, t) = W_k(x, t) + W_p(x, t) = \rho A^2 \omega^2 \cdot \sin^2(\omega t - kx). \quad (2.30)$$

Для *гармонічної хвилі* густина енергії, яка усереднена за періодом у часі або за довжиною хвилі в просторі, визначається як [11]:

$$W = \frac{\rho A^2 \omega^2}{2} = \frac{\rho v^2}{2} = \frac{P^2}{2\rho c^2} = 2\pi^2 f^2 \rho A^2. \quad (2.31)$$

Передача енергії відбувається через певну поверхню, і її кількісною характеристикою є *потік енергії*, тобто кількість енергії, що проходить через задану площу за одиницю часу. Якщо площа одинична і перпендикулярна до напрямку хвилі, то ця величина має назву *густини потоку акустичної енергії*.

Середня густина потоку енергії у часовому інтервалі є характеристикою, що визначає *інтенсивність акустичної хвилі* I , або так звану *силу звуку*. Ця величина пов'язана із *середньою густиною акустичної енергії* наступним співвідношенням:

$$I = W \cdot c. \quad (2.32)$$

Виходячи з цього, *інтенсивність* також може бути представлена через *амплітуду акустичного тиску* або *коливальної швидкості частинок*:

$$I = \frac{P^2}{2z} = \frac{P^2}{2\rho c} = \frac{zv^2}{2} = \frac{\rho v^2 c}{2} = \frac{Pv}{2}. \quad (2.33)$$

У практичних розрахунках інтенсивність вимірюють у ватах на квадратний метр (Вт/м²). Проте для зручності аналізу у широкому діапазоні значень застосовують *логарифмічну шкалу – рівень звукової інтенсивності (або рівень сили хвилі)*, що виражається у децибелах (дБ). Децибел визначається як десятикратний логарифм відношення виміряної інтенсивності до *референтного значення*, яке прийнято рівним $I_0 = 10^{-16}$ Вт/см², що відповідає нижній межі чутності для людського вуха [11].

Іншою важливою характеристикою є *випромінювальний тиск P_L* , або *тиск Ланжевена*, що виникає при взаємодії звукової хвилі з поверхнею. Якщо хвиля падає на абсолютно відбивну перешкоду, тиск, створений у результаті її дії, визначається виразом:

$$P_L = \frac{2I}{c}. \quad (2.34)$$

У разі, коли перешкода є повністю поглинаючою, тобто не відбиває, а повністю вбирає хвильову енергію, випромінювальний тиск зменшується вдвічі:

$$P_L = \frac{I}{c}. \quad (2.35)$$

До основних фізичних властивостей акустичних хвиль, що визначають їхню поведінку в різних середовищах і при переходах між ними, належать:

- *відбиття* (рефлексія),
- *заломлення* (рефракція),
- *інтерференція* (накладання хвиль),
- *дифракція* (огинання перешкод),
- *поглинання* (втрата енергії у середовищі),
- *розсіювання* (відхилення напрямку поширення),

- **дисперсія** (залежність швидкості від частоти),
- **поляризація** (визначеність напрямку коливань).

Відбиття акустичних хвиль є одним із базових механізмів взаємодії хвиль з неоднорідностями середовища або його межами. Це явище полягає у зміні напрямку поширення хвиль на межі двох середовищ із різними акустичними властивостями, у результаті чого частина енергії хвилі повертається в початкове середовище. При цьому може мати місце як часткове, так і повне **внутрішнє відбиття**, за умови значної різниці в імпедансах або при критичному куті падіння.

Паралельно з відбиттям часто спостерігається **заломлення** хвилі, коли вона переходить з одного середовища в інше під кутом до нормалі до границі розділу. У цьому випадку змінюється напрям поширення хвильового фронту в новому середовищі.

У випадку, коли **поздовжня хвиля** L падає під кутом на межу поділу двох твердих середовищ, у точці взаємодії відбувається складний процес **відбиття** та **заломлення**. У результаті цього на межі виникають кілька типів хвиль: **відбиті та заломлені поздовжні хвилі** (позначаються як L' і L'') та **зсувні (поперечні) хвилі** – S' та S'' , які поширюються в обох середовищах під різними кутами (рис. 2.4). Це зумовлено різними хвильовими характеристиками матеріалів, зокрема, **швидкостями розповсюдження хвиль** та **густинами** середовищ [12].

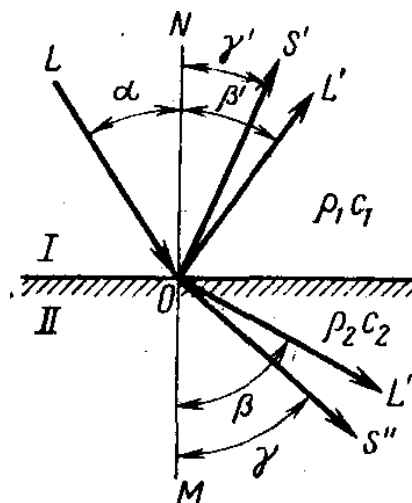


Рис. 2.4 – Схема відбиття і проходження пружних хвиль на границі двох середовищ при похилому падінні променів [12]

У цьому контексті:

- кут α між падаючим променем LO та перпендикуляром NM до межі в точці падіння O називають **кутом падіння**;
- кути β' і γ' – **кути відбиття** відповідно для поздовжньої та зсувної хвиль у першому середовищі;
- кути β і γ – **кути заломлення** (або кути введення) відповідно для поздовжньої та зсувної хвиль у другому середовищі.

Кількісна оцінка процесів відбивання та заломлення ґрунтується на введенні **коефіцієнтів відбивання** K_v і **пропускання** $K_{пр}$, які характеризують частки інтенсивності падаючої хвилі $I_{п}$, що відповідають інтенсивності відбитої I_v та проходячої $I_{пр}$ хвиль:

$$K_v = \frac{I_v}{I_{п}}. \quad (2.36)$$

та

$$K_{пр} = \frac{I_{пр}}{I_{п}}. \quad (2.37)$$

Закони поширення хвиль у цьому випадку аналогічні законам геометричної оптики й формулюються так само, як і для світлових хвиль. Якщо виконується умова $\rho_1 C_1 > \rho_2 C_2$, тобто **хвильовий опір** першого середовища більший, ніж у другого, то співвідношення між кутами описується рівнянням [12]:

$$\frac{\sin \alpha}{C_{пр1}} = \frac{\sin \gamma'}{C_{сдв1}} = \frac{\sin \beta}{C_{пр2}} = \frac{\sin \gamma}{C_{сдв2}}, \quad (2.38)$$

де $C_{пр1}$, $C_{пр2}$ – швидкості поздовжніх хвиль у першому й другому середовищах відповідно;

$C_{сдв1}$, $C_{сдв2}$ – швидкості зсувних хвиль у першому та другому середовищах.

Відповідно до [12] існують *два критичні кути*, при досягненні яких характер поширення хвиль змінюється:

1. *Перший критичний кут α* : за цього кута переломлена поздовжня хвиля не проникає вглиб другого середовища, а поширюється *вдovж межі* як поверхнева хвиля.

2. *Другий критичний кут α* : за подальшого збільшення кута падіння зсувна хвиля також переходить у режим поверхневого поширення.

Якщо хвилі мають *лінійний характер* (тобто амплітуда збурень є малою, і хвиля підпорядковується класичному хвильовому рівнянню), то вони не змінюють параметри середовища, в якому поширюються. У такому випадку застосовується *принцип суперпозиції*, згідно з яким кожна хвиля поширюється незалежно від інших, а загальне зміщення частинок середовища визначається *векторною сумою* зміщень, викликаних окремими хвильовими компонентами.

Результатом суперпозиції є *інтерференція* – явище, при якому амплітуда результуючої хвилі змінюється залежно від фазового співвідношення між окремими хвилями. При цьому спостерігається посилення або послаблення загальної амплітуди. Усі хвилі можуть інтерферувати, проте *стала інтерференційна картина* виникає лише у разі *когерентності* – коли хвилі мають однакову частоту, сталі фазові співвідношення та коливаються в одній площині. У результаті інтерференції утворюються просторові області з чергуванням максимумів та мінімумів інтенсивності – енергія акустичного поля розподіляється нерівномірно: у зонах максимумів вона зосереджується, а в зонах мінімумів практично відсутня [11].

Коли дві однакові плоскі хвилі поширюються назустріч одна одній, як це має місце при повному відбитті від межі поділу середовищ (наприклад, між твердим тілом і газом), утворюється *стояча (нерухома) хвиля*. Такі хвилі виникають внаслідок інтерференції двох когерентних хвиль однакової частоти та амплітуди, які рухаються в протилежних напрямках. У стоячій хвилі просторовий розподіл залишається сталим у часі – спостерігаються *вузли*

(точки з нульовою амплітудою) та *пучності* (точки з максимальною амплітудою). Попри наявність коливального процесу, енергія в середовищі не переноситься, оскільки потоки енергії протилежних хвиль взаємно компенсуються. Математично такі хвилі описуються як сума двох гармонічних хвиль однакової амплітуди, що рухаються в протилежних напрямках.

$$\xi(x, t) = 2A \cdot \cos(kx) \cdot \cos(\omega t) = 2A \cdot \cos\left(\omega \frac{x}{c}\right) \cdot \cos(\omega t). \quad (2.39)$$

У таких хвилях формуються *вузли* (точки без коливань) і *пучності* (з максимальними зміщеннями), що чергуються через кожні півхвилі. Енергія в межах між вузлами лишається сталою, перетворюючись між кінетичною та потенціальною формами. Ідеальна нерухома хвиля можлива лише за повної відсутності втрат і повного відбиття. У реальних умовах утворюється *змішаний режим* – комбінація нерухомої та біжучої хвиль, остання з яких переносить енергію до зон поглинання або випромінювання [11].

Явище *резонансу* стоячих хвиль спостерігається у скінченних пружних середовищах – наприклад, між двома паралельними межами, розташованими на відстані l . Ультразвукова хвиля, багаторазово відбиваючись між цими межами, може зберігати постійну фазу відносно джерела, якщо виконуються умови резонансу. Основною умовою є те, що повний фазовий зсув під час одного циклу поширення хвилі в обидва боки (включаючи фазові зміни при кожному відбитті) має бути кратним 2π . У таких умовах відбувається *фазове накладання хвиль*, що призводить до різкого зростання амплітуди – характерної ознаки резонансного явища. Частота, при якій це спостерігається, відповідає одній із *власних частот системи*, що визначаються її геометрією та фізичними параметрами [11].

Дифракція — це хвильове явище, що проявляється у відхиленні хвиль від прямолінійного поширення, особливо поблизу перешкод або отворів. Воно виникає, коли довжина хвилі є співрозмірною з розмірами об'єкта, і призводить до поширення хвиль у зони, які в геометричній акустиці вважаються «тіньовими».

Цей ефект характерний для усіх типів хвиль, зокрема ультразвукових, і спричиняє зниження, але не повне зникнення інтенсивності за перешкодами. Дифракція часто розглядається як частковий прояв інтерференції, оскільки базується на накладанні хвиль, зокрема вторинних, що виникають на краях перешкод.

Поглинання – це процес зменшення енергії акустичної хвилі під час її проходження через середовище, при якому частина енергії втрачається при взаємодії з речовиною.

Розсіювання – явище, за якого частина хвильової енергії змінює напрямок поширення внаслідок взаємодії з неоднорідностями середовища або перешкодами, утворюючи вторинні хвилі.

Дисперсія – це залежність фазової швидкості поширення лінійних хвиль від їхніх частот, що призводить до розділення хвиль різних частот у часі або просторі.

Поляризація – це властивість хвиль, що характеризує напрямок коливань частинок середовища відносно напрямку поширення хвилі. Для **поперечних хвиль** поляризація визначає орієнтацію **площини** коливань. У контексті ультразвуку в рідинах і газах, де поширюються переважно **поздовжні хвилі**, поляризація як така не проявляється, однак вона набуває значення при розгляді поперечних хвиль у твердих тілах.

2.2 Пристрої ультразвукових хвиль та їх практичне застосування

Ультразвуком називають пружні хвилі з частотами в межах від 20 кГц до 1 ГГц, тоді як хвилі з частотами від 10^9 до 10^{13} Гц відносять до гіперзвуку. Частотний спектр ультразвуку умовно поділяють на три піддіапазони: низькочастотний (20 кГц – 100 кГц), середньочастотний (100 кГц – 10 МГц) і високочастотний (10 МГц – 1 ГГц). Кожен з них має характерні особливості, що впливають на способи генерації, детектування, поширення в середовищах і практичне використання, зокрема в медицині, технічній діагностиці та фізичних дослідженнях.

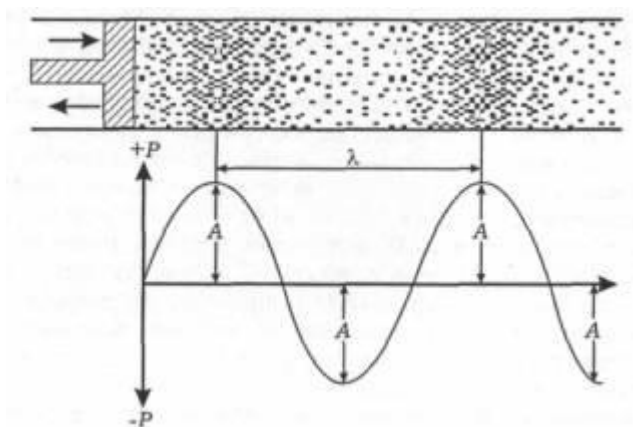


Рис. 2.5 – Схема поширення ультразвукових хвиль

Для генерації ультразвукових хвиль використовують різноманітні пристрої, які за принципом дії поділяють на дві основні групи: **механічні та електромеханічні**.

До **механічних** джерел належать акустичні пристрої, зокрема повітряні та гідравлічні сирени і свистки, які створюють ультразвук шляхом періодичних механічних коливань струменя повітря або рідини. Проте через обмежену частотну стабільність і малу ефективність, їх застосовують рідко, переважно в демонстраційних або історичних цілях.

Основну роль у сучасних технологіях відіграють **електромеханічні генератори ультразвуку**, які здійснюють перетворення електричних коливань у механічні. До цієї групи належать:

- **Електродинамічні випромінювачі**, що працюють за дією змінного електричного струму на котушку, розташовану в магнітному полі. Струм створює змінне магнітне поле, яке викликає рух (вібрацію) прикріпленої до котушки мембрани. Мембрана коливається з частотою струму, випромінюючи ультразвук;
- **Електростатичні випромінювачі**, що складаються з тонкої мембрани (зазвичай металізованої) і жорсткого електрода, між якими прикладається змінна напруга. Електростатичне поле змінюється з частотою сигналу, змінюючи силу притягання до мембрани – вона починає вібрувати й випромінювати звук;
- **П'єзоелектричні випромінювачі**, які використовують ефект, за якого деякі кристали (наприклад, кварц або титанат барію) змінюють форму під дією електричного поля. Під дією змінної напруги кристал коливається, створюючи механічні (ультразвукові) хвилі;
- **Електромагнітні випромінювачі**, що використовують взаємодію змінного магнітного поля з провідником або мембраною. Індуковані електромагнітні сили спричиняють механічні коливання випромінюючого елемента.
- **Магніострикційні випромінювачі**, в яких коливання виникають внаслідок зміни довжини феромагнітного матеріалу під впливом змінного магнітного поля. Матеріал періодично стискається і розтягується, генеруючи ультразвукові коливання.

У технічних системах ультразвукового неруйнівного контролю (НК) найширше застосовуються *п'єзоелектричні перетворювачі*, принцип дії яких базується на *п'єзоелектричному ефекті* [11].

Прямий п'єзоелектричний ефект – це фізичне явище, за якого в діелектричних кристалах виникає електрична поляризація під дією *механічної напруги*. Іншими словами, при деформації п'єзоелектричного матеріалу на його протилежних поверхнях накопичуються електричні заряди, величина яких

пропорційна прикладеним механічним зусиллям. Це явище описується *лінійною залежністю* [13]:

$$Q = d \cdot F, \quad (2.40)$$

де Q – індукований електричний заряд,

d – п'єзомодуль прямого ефекту (залежно від матеріалу),

F – прикладене зусилля.

Також цю залежність можна подати через інші фізичні величини для універсальності розрахунків:

$$\frac{Q}{S} = \sigma = \frac{d \cdot F}{S} = d \cdot T = P, \quad (2.41)$$

де S – площа поверхні електродів,

σ – поверхнева щільність заряду,

T – механічна напруга (тиск),

P – поляризованість;

У разі *зворотного п'єзоелектричного ефекту* діелектрик змінює свої геометричні розміри – подовжується або скорочується – під впливом електричного поля. Ця зміна довжини Δl відбувається відповідно до лінійної залежності від напруженості електричного поля E [13]:

$$\frac{\Delta l}{l} = \delta = d \cdot E, \quad (2.42)$$

де δ – відносна деформація,

d – п'єзомодуль зворотного п'єзоелектричного ефекту (стала величина в залежності від матеріалу).

Згідно з принципами термодинаміки, п'єзомодулі прямого та зворотного п'єзоелектричних ефектів для одного й того самого матеріалу чисельно збігаються, тобто $d_{\text{прямий}} = d_{\text{зворотний}}$.

Також виокремлюють два типи п'єзоелектричного ефекту: *поздовжній* і *поперечний*. У випадку поздовжнього ефекту напрям дії механічних зусиль (наприклад, стиску чи розтягування) збігається з напрямом електричного поля. Натомість при поперечному п'єзоелектричному ефекті ці напрямки взаємно

перпендикулярні (ортогональні), тобто електричне поле прикладається в напрямі, що перетинає вісь механічного навантаження [13].

П'єзоефект є характерним для певного класу діелектриків і напівпровідників. При цьому зворотний п'єзоефект можна розглядати як окремий випадок *електрострикції* – властивості зміни геометричних розмірів тіла під дією зовнішнього електричного поля, яка притаманна всім кристалічним речовинам. Відмінність полягає в тому, що п'єзоефект проявляється лише в кристалах, симетрія яких порушена [11].

Поляризація діелектрика, тобто його здатність до накопичення дипольного моменту, характеризується вектором *поляризованості* P – сумою дипольних моментів на одиницю об'єму. Поляризованість корелюється з *електричною індукцією* D і *напруженістю електричного поля* $E_{\text{ел}}$ наступним чином:

$$D = \varepsilon_0 \cdot E_{\text{ел}} + P, \quad (2.43)$$

де $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м (електрична стала).

Абсолютна діелектрична проникність середовища:

$$\varepsilon_a = \varepsilon_{\text{ел}} \cdot \varepsilon_0, \quad (2.44)$$

де $\varepsilon_{\text{ел}}$ – відносна діелектрична проникність матеріалу.

Найвищі значення діелектричної проникності спостерігаються у матеріалів сегнетоелектричного типу, для яких також характерна виражена п'єзоелектрична активність. Сегнетоелектрики здатні зберігати залишкову (спонтанну) електричну поляризацію навіть після усунення зовнішнього електричного поля, а також демонструють явище *електричного гістерезису* – залежність поляризації від прикладеної напруги [11].

Ці матеріали проявляють суттєву нелінійність у своїх електрофізичних характеристиках, тобто їхні параметри (наприклад, ємність, поляризація чи механічна деформація) змінюються в залежності від величини та характеру зовнішніх впливів. Водночас сегнетоелектрики характеризуються підвищеними

електричними та механічними втратами порівняно з іншими діелектричними матеріалами.

Сегнетоелектричні матеріали поділяють на *монокристалічні* та *полікристалічні*, останні з яких широко відомі як *п'єзокераміка*. У галузі ультразвукової техніки найбільш поширеними є саме п'єзоперетворювачі на основі п'єзокерамічних матеріалів [11].

П'єзокераміку отримують шляхом високотемпературного спікання дрібнодисперсних п'єзоелектричних кристалів із додаванням спеціальних сполучних речовин (легуючих домішок). Після спікання диполі окремих зерен орієнтовані хаотично, тому для надання матеріалу п'єзоелектричних властивостей здійснюється *поляризація*: до зразка прикладається сильне електричне поле за підвищеної температури. У результаті диполі орієнтуються переважно вздовж напрямку поля, створюючи в матеріалі стабільну п'єзоактивну вісь, уздовж якої можлива максимальна електромеханічна деформація.

П'єзокераміка схильна до *старіння*, тобто її електричні та механічні властивості змінюються з часом внаслідок релаксаційних процесів у структурі. Крім того, вона є досить *крихким* матеріалом, що обмежує її використання в умовах динамічного чи ударного навантаження. Оскільки робоча *товщина п'єзопластини обернено пропорційна частоті генерованих ультразвукових хвиль*, то при підвищенні частоти вона істотно зменшується. Це призводить до підвищеної механічної вразливості тонких пластин до крихкого руйнування під час експлуатації [11].

Зміна товщини п'єзоелектричної пластини Δh під час генерації акустичного імпульсу відбувається пропорційно до прикладеної електричної напруги U , що описується лінійним співвідношенням:

$$\Delta h = d \cdot U, \quad (2.45)$$

де d – п'єзоелектричний модуль зворотного ефекту (визначає ступінь механічної деформації матеріалу у відповідь на прикладене електричне поле).

Під час приймання акустичного сигналу амплітуда генерованої змінної напруги U є пропорційною до тиску, деформації або кореня квадратного з інтенсивності падаючої хвилі [11]. Цей зв'язок виражається наступною формулою:

$$U = e \cdot \Delta h, \quad (2.46)$$

де e – п'єзоконстанта, що визначає величину електричного відгуку на одиничну механічну деформацію.

Максимально допустиме значення напруги U_{\max} , яке можна прикласти до п'єзопластини без порушення її структури, обмежується **електричною міцністю матеріалу**. Вона залежить від максимально допустимої напруженості електричного поля E_{\max} . На практиці зберігається лінійна залежність між деформацією та полем лише до рівня, що становить приблизно 30 % від напруженості, тому гранична напруга задається як:

$$U_{\max} = 0,3 \cdot E_{\max} \cdot h, \quad (2.47)$$

де h – товщина п'єзоелектричної пластини.

Коливальний п'єзокристал функціонує як електромеханічний перетворювач [11]. **Коефіцієнт електромеханічного зв'язку β** встановлює його ефективність як в режимі генерації, так і в режимі приймання ультразвукових коливань, і визначається наступною формулою:

$$\beta = \sqrt{\frac{W_M}{W}} = \sqrt{\frac{W_e}{W}}, \quad (2.48)$$

де W_M – механічна енергія, запасена в результаті деформації,

W_e – енергія електричного поля, утвореного в п'єзоелементі,

W – повна енергія, що включає як механічну, так і електричну складові.

Акустичне поле ультразвукового перетворювача – це просторовий об'єм, у якому поширюються збуджені ним пружні коливання. Основні параметри цього поля визначають ефективність дефектоскопічного контролю та залежать від просторового положення точки, характеристик перетворювача і властивостей середовища [11].

Розрізняють три типи акустичних полів:

- *Поле випромінювання* I_v – описує амплітуду та фазу тиску, створеного перетворювачем у заданій точці простору;
- *Поле прийому* I_{π} – визначає реакцію перетворювача на сигнал від точкового всеспрямованого джерела, розміщеного в цій точці;
- *Поле випромінювання-прийому* $I_{\text{вп}}$ – характеризує сигнал, утворений при відбитті випромінених хвиль від точкового розсіювального об'єкта.

Джерелом акустичного поля може бути не лише сам перетворювач, а й інші елементи – відбивачі, межі поділу середовищ тощо.

Основні чинники, що впливають на характеристики поля [11]:

- Геометричні та конструктивні параметри перетворювача;
- Тип перетворювача
- Частота коливань;
- Тривалість імпульсу;
- Фізико-механічні властивості середовища.

Основні показники п'єзоелектричних перетворювачів (ПЕП) поділяють на *вимірювані*, що отримуються експериментально, та *розрахункові*, які визначаються аналітично на основі цих вимірювань [13].

Вимірювані параметри:

Ємність C_0 , Φ – ємність у нерезонансному режимі, яка характеризує здатність акумулювати заряд.

Тангенс кута діелектричних втрат $\tan(\delta)$ – показує відносні енергетичні втрати в п'єзоматеріалі при перемінному електричному полі; чим менше значення, тим нижчі втрати.

Резонансна частота товщинних коливань f_p , Гц – частота, при якій імпеданс ПЕП мінімальний, відповідає ефективному механічному резонансу вздовж товщини.

Антирезонансна частота f_a , Гц – частота, при якій імпеданс максимальний; виникає через взаємодію механічного та електричного резонансів.

Радіальна резонансна частота f_r , Гц – резонансна частота, пов'язана з деформацією в площині пластини (радіальний напрямок).

Опір на резонансі R_p , Ом – активна складова опору на резонансній частоті, що враховує втрати.

П'єзомодуль d_{33} , Кл/Н – характеризує прямий п'єзоефект при деформації вздовж напрямку прикладеного електричного поля.

Розрахункові параметри:

Діелектрична проникність ε – характеристика здатності матеріалу до поляризації під дією електричного поля; пов'язана з ємністю і геометрією ПЕП.

П'єзомодуль d_{31} , Кл/Н – відображає зв'язок між електричним полем і механічною деформацією в напрямку, перпендикулярному до поля (поперечний ефект).

Добротність Q – відношення запасеної енергії до втраченої за цикл коливань; вища добротність вказує на менші втрати.

Модуль Юнга $E_{ю}$, Па – описує жорсткість матеріалу, тобто відношення напруження до деформації при пружному розтягуванні або стиску.

Коефіцієнт електромеханічного зв'язку β – міра ефективності перетворення електричної енергії в механічну і навпаки.

Питомий електричний опір ρ_v , Ом·м – електричний опір одиниці об'єму матеріалу; важливий для оцінки втрат при збудженні.

Швидкість поширення поздовжніх хвиль C_l , м/с – швидкість акустичних коливань, які розповсюджуються в напрямку дії збурення; залежить від модулю пружності та густини матеріалу.

Джерело [11] подає, що залежно від способу введення ультразвукових коливань у матеріал, перетворювачі поділяють на кілька типів:

- **Контактні** – працюють шляхом прямого контакту з поверхнею об'єкта, попередньо змащеною рідким акустичним з'єднувачем (наприклад, маслом або гліцерином). У деяких випадках рідину замінюють м'яким еластичним інтерфейсом (протектором).

- **Імерсійні** – функціонують через товстий шар рідини, в яку повністю або частково занурюється контрольований виріб; застосовуються для стабільного акустичного з'єднання.

- **Щілинні (меніскові)** – формують вузький зазор (порядку довжини хвилі), де рідина утримується за рахунок поверхневого натягу.

- **З сухим точковим контактом** – мають опуклу контактну поверхню, що утворює локальне з'єднання з виробом на дуже малій площі ($0,01-0,5 \text{ мм}^2$) без потреби у рідкому посереднику.

- **Безконтактні перетворювачі** здійснюють збудження ультразвукових хвиль через повітряний проміжок, використовуючи повітряно-акустичний зв'язок.

Крім того, за конструкцією п'єзоелектричного елемента виділяють [11]:

- **Монолітні перетворювачі** мають пласку п'єзопластину, що створює ненаправлене акустичне поле.

- **Фокусувальні перетворювачі**, в яких п'єзокомпонент або акустична система формує зосереджене (фокусоване) поле в заданій точці середовища, що покращує локалізацію дефектів.

- **Лінійні та конвексні розподілені перетворювачі**, які складаються з набору окремих елементів і дозволяють здійснювати сканування або електронне фокусування за допомогою фазованого керування.

Нижче на рис. 2.6 наведено еквівалентну електричну схему п'єзоперетворювача, побудовану за методом електромеханічних аналогій. Вона адекватно описує електричні характеристики ненавантаженого п'єзоелемента поблизу основного резонансу [13].

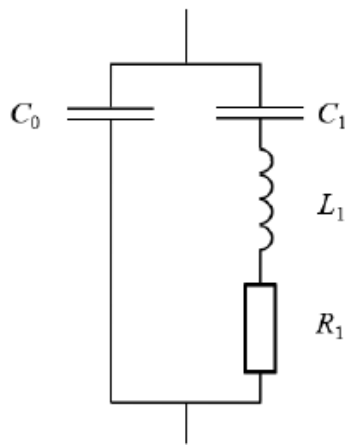


Рис. 2.6 – Еквівалентна схема ПЕП [13]

У схемі індуктивність L_1 відповідає масі коливальної системи, ємність C_1 – її пружній податливості, а опір R_1 – сумарним втратам: внутрішнім механічним та втратам на випромінювання. Статична ємність C_0 утворюється електродами п'єзоелемента та визначає електричну гілку схеми. Елементи L_1 , C_1 та R_1 формують так звану механічну гілку й залежать від матеріалу, геометрії, поляризації та конструктивних особливостей перетворювача.

Еквівалентна схема включає два резонансні контури: послідовний – механічний (резонанс напруг) і паралельний – електромеханічний (резонанс струмів). У першому випадку реактивні опори L_1 і C_1 компенсують один одного, і ПЕП поводить ся як паралельне з'єднання R_1 і C_0 . При паралельному резонансі у внутрішніх гілках виникають великі, протифазні струми, що взаємно компенсуються, не виходячи за межі контуру. Опір при послідовному резонансі мінімальний, що забезпечує максимум вихідного струму, тоді як при антирезонансі – максимальний і переважно активний, з мінімальним струмом на виході [13].

На рис. 2.7 зображено еквівалентні схеми п'єзоперетворювача при випромінюванні у воду (а) та повітря (б). Статична ємність C_0 та опір діелектричних втрат R_0 моделюють електричну гілку. Динамічні елементи – індуктивність L_d , ємність C_d , опір внутрішніх втрат R_T та динамічний опір випромінювача $R_B = \frac{r_{\text{вип}}}{n^2}$, де $r_{\text{вип}}$ – механічний опір випромінювання, n – коефіцієнт електромеханічного перетворення [14].

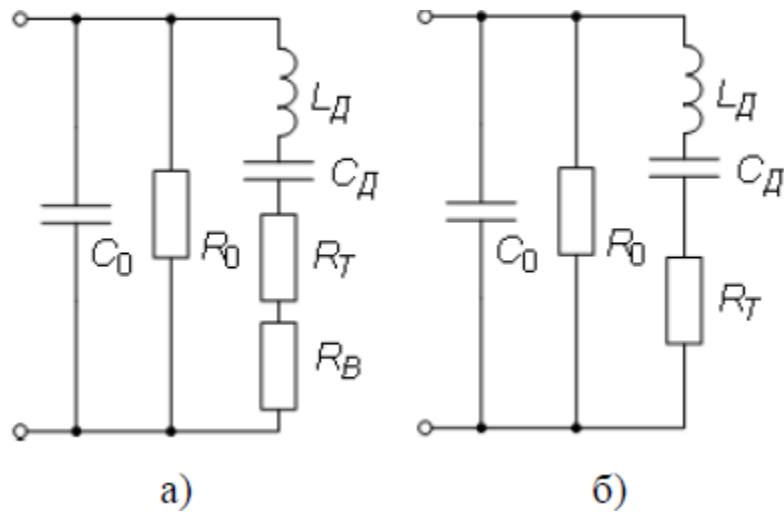


Рис. 2.7 – Еквівалентні схеми перетворювача (а – у воді, б – у повітрі) [14]

На резонансі, за умови великих R_0 (незначні діелектричні втрати), схема спрощується (рис. 2.8).

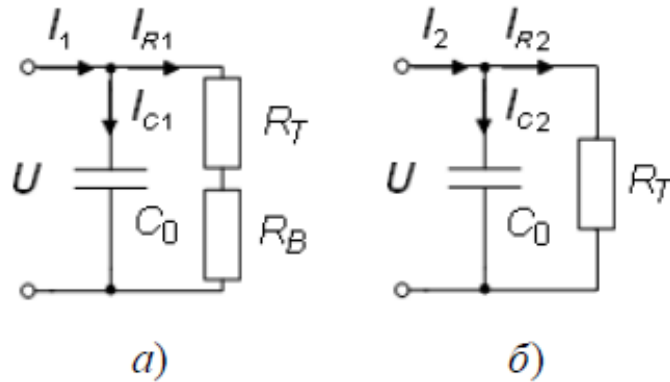


Рис. 2.8 – Еквівалентні схеми перетворювача з врахуванням малих діелектричних втрат [14]

Вхідна електрична потужність:

$$P_e = \frac{U^2}{R_T + R_B}, \quad (2.49)$$

де U – величина напруги на вході.

Акустична потужність:

$$P_a = \frac{U^2 R_B}{(R_T + R_B)^2}. \quad (2.50)$$

Звідси ККД перетворення:

$$\eta_{ae} = \frac{P_a}{P_e} = \frac{R_B}{R_T + R_B}. \quad (2.51)$$

Ультразвукова дефектоскопія найчастіше застосовує **контактні перетворювачі**, які забезпечують ефективне збудження і приймання хвиль. Перетворювачі, що вводять хвилю перпендикулярно до поверхні об'єкта контролю (ОК), називаються **прямими** або **нормальними**; якщо під кутом – **похилими** або **призматичними** [11].

За схемою підключення розрізняють **суміщені**, **роздільні** та **роздільно-суміщені** перетворювачі. У суміщених конструкціях один п'єзоелемент виконує функції випромінювання і прийому сигналу, у роздільних – для цього застосовуються вже 2 п'єзоелементи, кожний з власною функцією. У роздільно-суміщених – в одному корпусі встановлюють два п'єзоелементи, розділені електроакустичним екраном, що запобігає прямому проходженню сигналу між ними.

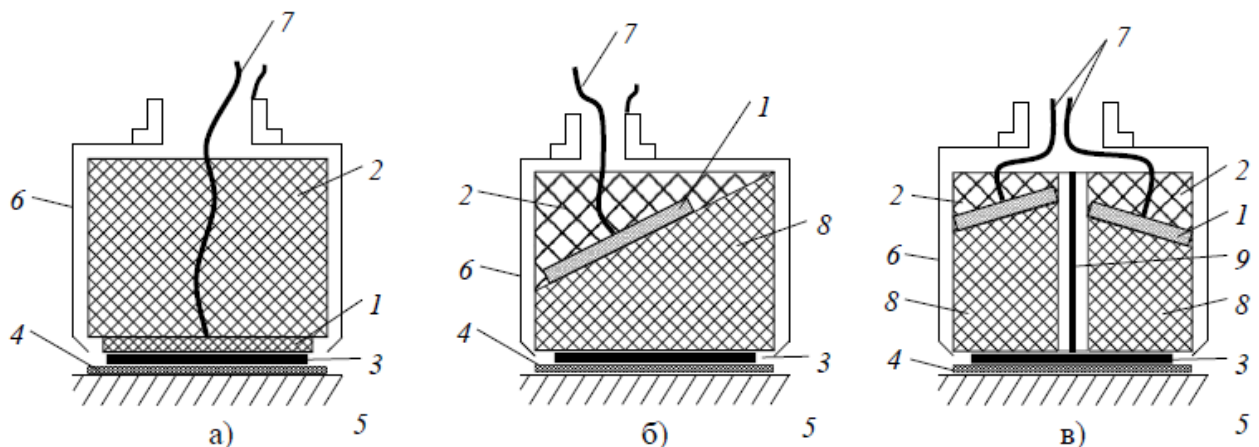


Рис. 2.9 – Варіації конструкцій УЗ-датчиків (а – прямий, б – похилий, в – роздільно-суміщений)

У **прямому суміщеному контактному перетворювачі** п'єзопластина 1 розміщена між демпфером 2 і протектором 3 та вмонтована в корпус 6. П'єзопластина з'єднується з електронним блоком приладу виводами 7. Передача ультразвукових коливань до ОК 5 здійснюється через контактну рідину 4, яка забезпечує акустичне з'єднання. Такі перетворювачі формують переважно **поздовжні хвилі** [11].

Похилі контактні перетворювачі мають призму 8, через яку ультразвукова хвиля вводиться в ОК під кутом. Вони призначені для генерації **зсувних** або **поверхневих хвиль**. У **роздільно-суміщених** схемах дві призми 8 з

п'єзопластинами 1 розділені екраном 9, що дозволяє окремо реалізовувати випромінювання та приймання, мінімізуючи паразитні сигнали [11].

Ультразвукова дефектоскопія знаходить широке застосування у різних сферах неруйнівного контролю. Зокрема, вона використовується для:

- оцінки цілності матеріалів (виявлення тріщин, розшарувань, включень, пористості, непропаювань, втомлених дефектів тощо);
- вимірювання геометричних параметрів (товщина стінок труб, листів, резервуарів, габарити виробів);
- аналізу внутрішньої структури (визначення пористості, типу включень, структури металу після термообробки, зон корозії тощо);
- оцінки фізико-механічних властивостей (швидкість і затухання пружних хвиль, модулі пружності та зсуву, коефіцієнт Пуассона, міцність і твердість);
- моніторингу процесів руйнування (зони концентрації напружень, ранні стадії втомного пошкодження).

Методи ультразвукового контролю поділяються на **активні** (збудження хвиль зовнішнім джерелом і їх прийом) та **пасивні** (реєстрація хвиль, що виникають безпосередньо в об'єкті під впливом внутрішніх процесів).

Активні методи акустичного контролю:

Тіньовий метод

Суть полягає в ослабленні або повному зникненні сигналу за дефектом. Виявлення здійснюється шляхом реєстрації «тіні», яка утворюється за дефектом у напрямку поширення ультразвукової хвилі.

Тимчасово тіньовий метод

Визначає момент появи «тіні» в часі. Дає змогу оцінити розташування дефекту за часом проходження хвилі через зону контролю.

Лунометод (ехо-метод)

Виявляє дефекти за сигналами, що відбиваються від внутрішніх неоднорідностей. Час затримки відбитого сигналу дозволяє визначити глибину дефекту.

Лунодзеркальний метод

Поєднує пряме і дзеркальне відбиття: сигнал проходить до дефекту, частково відбивається, доходить до протилежної стінки, відбивається назад до дефекту, і повертається до приймача.

Дзеркальний метод

Сигнал, після відбиття від дефекту, відбивається від протилежної стінки об'єкта та повертається до приймача. Використовується для виявлення глибоких або слабких відбиттів.

Ревербераційний метод

Багаторазові відбиття сигналу між межами об'єкта дозволяють визначити втрати енергії, що пов'язані з наявністю дефектів або неоднорідностей.

Велосиметричний метод

Основний принцип полягає в оцінці швидкості розповсюдження УЗ хвиль. Зміна швидкості сигналу свідчить про зміну структури матеріалу або наявність пошкоджень.

Пасивні методи акустичного контролю:

Акустико-емісійний метод. Виявляє мікросигнали, які утворюються при руйнуванні матеріалу (тріщини, зсуви, пластичні деформації). Дозволяє контролювати об'єкти під навантаженням у реальному часі.

Вібраційно-діагностичний метод. Аналіз коливань, що виникають у технічних системах при їх нормальній або зміненій роботі. Виявляє розбалансування, зношення підшипників, резонансні явища.

Шумодіагностичний метод. Дослідження акустичного шуму, що виникає в результаті роботи обладнання. Зміна спектральних характеристик шуму свідчить про несправності або зміни в роботі.

Прилади, що використовують ультразвук, поділяються на кілька основних типів залежно від галузі застосування та принципу дії. Більшість використовуються у неруйнівних методах контролю, очищенні та медицині:

1. Дефектоскопи

Призначення: виявлення внутрішніх дефектів у матеріалах (тріщин, включень, порожнин).

2. Товщиноміри

Призначення: вимірювання товщини матеріалів без доступу до зворотної сторони за визначенням часу проходження ультразвукової хвилі в матеріалі ОК.

Застосування: контроль зносу труб, резервуарів, листового металу.

3. Ультразвукові витратоміри

Призначення: вимірювання швидкості та витрати рідин і газів у трубопроводах

4. Ультразвукові очищувальні споруди

Призначення: очищення поверхонь від забруднень, жиру, окислів тощо, використовуючи явище кавітації в рідині, викликаного ультразвуковими хвилями.

5. Ультразвукові медичні прилади

Призначення: діагностика або терапія

Основні види: ехографи (ультразвукові сканери – візуалізація внутрішніх органів, судин, плода), ультразвукові терапевтичні апарати (фізіотерапія, лікування м'язових або суглобових захворювань), літотриптори (УЗ-пристрої для роздроблення каменів).

6. Ультразвукові сенсори

Призначення: вимірювання відстані, рівня рідини, наявності об'єкта за вимірюванням часу відбиття ультразвукової хвилі від поверхні. Широко використовується в автоматичі та робототехніці.

7. Ультразвукові генератори та п'єзоперетворювачі

Призначення: генерація, модуляція та прийом ультразвукових хвиль з їх подальшим аналізом для наступних досліджень та експериментів. Зазвичай наявні як основні вузли всіх вищенаведених систем.

Також варто зауважити таку галузь як *сонохімія*, що знаходить все більше застосувань в сучасній науці. Сонохімічні методи відкривають

перспективи для нових методів очистки води, синтезу наноматеріалів і руйнування стійких забруднювачів у середовищі.

Сонохімія – міждисциплінарна галузь хімії, що вивчає хімічні реакції та перетворення, ініційовані або модифіковані під впливом ультразвукових хвиль, зазвичай у діапазоні частот 20–1000 кГц. Основний механізм сонохімічних ефектів пов'язаний з явищем акустичної кавітації – формуванням, зростанням та імплозією бульбашок у рідкому середовищі. Такий колапс забезпечує утворення високореакційноздатних радикалів і збуджених частинок.

Сонокаталіз є різновидом сонохімії, в якому ультразвукове випромінювання активує або посилює каталіз у присутності твердих каталізаторів (часто напівпровідникової природи, наприклад TiO_2). Ультразвук сприяє активації поверхні каталізатора, полегшенню масопереносу реагентів та утворенню активних форм кисню, що зумовлює ефективне протікання реакцій окиснення, деградації органічних речовин або знезараження середовищ.

Висновки

Другий розділ присвячено фізичній основі процесів, пов'язаних із хвилями та коливаннями, які застосовуються в технологіях очищення води. Описано класифікацію хвиль (поздовжні, поперечні, механічні, електромагнітні), а також їх основні параметри: частота, амплітуда, довжина хвилі, швидкість поширення, інтенсивність.

Основну увагу зосереджено на ультразвукових хвилях як різновиді високочастотних механічних коливань, здатних поширюватися в рідких та твердих середовищах. Детально описано механізм взаємодії УЗ з водним середовищем.

Розглянуто параметри ультразвуку, що мають визначальний вплив на процес очищення: частота (20–100 кГц для технічного застосування), потужність, амплітуда тиску, щільність енергії. Також висвітлено фактори, які впливають на ефективність передачі хвилі від перетворювача до робочого

середовища, зокрема імпедансне узгодження, наявність резонансних ефектів, втрати при переході середовищ.

Отримані результати свідчать про складний, багатофакторний характер дії ультразвуку, який, у поєднанні з гідродинамічними явищами, створює умови для глибокого знезараження та очищення води.

3. РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДУ ОЧИЩЕННЯ ТА ФІЛЬТРАЦІЇ ВОДИ З ВИКОРИСТАННЯМ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ХВИЛЬ

В умовах інтенсифікації антропогенного навантаження на водні ресурси та зростання вимог до екологічної безпеки очищення стічних вод актуальності набувають інноваційні технології, здатні ефективно усувати як хімічні, так і біологічні забруднення. Одним із перспективних напрямів є використання ультразвукових хвиль у процесах доочищення та знезараження. Характер дії ультразвуку на водні середовища, зокрема його здатність до локалізованого енергетичного впливу через кавітаційні явища, відкриває широкі можливості для застосування у водоочисних технологіях. Додатковими перевагами виступають компактність обладнання, низька енергозалежність та простота інтеграції в існуючі системи.

Фізико-хімічний механізм ультразвукового знезараження базується на дії високочастотних акустичних хвиль, які створюють динамічні напруження в середовищі, що спричиняють руйнування клітинних оболонок мікроорганізмів. Одночасно, за рахунок імплузії кавітаційних бульбашок у рідині, відбувається генерація високореакційноздатних радикалів ($\bullet\text{OH}$, $\bullet\text{H}$), які беруть участь у деструкції органічних забрудників. Такий подвійний – механічний та хімічний – ефект забезпечує високу ефективність очищення без необхідності застосування додаткових хімічних реагентів або складних багатоступеневих схем. Ультразвукове знезараження таким чином демонструє значний потенціал для впровадження в екологічно орієнтовані технології водоочищення нового покоління.

Надалі представлено конкретне дослідження, спрямоване на вивчення особливостей застосування ультразвуку для очищення та знезараження води, аналіз ефективності різних режимів ультразвукового опромінення, а також оцінку можливостей практичного використання цієї технології в умовах реальних водоочисних систем.

3.1 Теоретичні основи знезараження та аерації води

Історія дослідження кавітації

Явище *кавітації* було передбачене ще у XVIII столітті, коли Леонард Ейлер висловив припущення про можливість утворення порожнин у рідині. У XIX столітті В. Бесант і О. Рейнольдс досліджували динаміку схлопування бульбашок, а також умови їх виникнення при кипінні. Сам термін «кавітація» вперше використали Торнікрофт і Фруде у 1895 році, спостерігаючи утворення порожнин на суднових гвинтах.

Практичне значення кавітації стало очевидним під час випробувань кораблів «Дерінг» та «Турбінія», коли зниження швидкості виявилось наслідком утворення парових бульбашок на гвинтах. Це спричинило активні експериментальні дослідження, зокрема у гідродинамічному тунелі компанії Parsons.

У 1917 році Лорд Релей запропонував математичну модель схлопування бульбашки в ідеальній рідині. Його робота, а також дослідження С. С. Кука, показали, що при схлопуванні виникає імпульсний тиск, здатний руйнувати тверді поверхні. Ці висновки підтвердили акустичні дослідження Гаррісона (1952) та Гюта (1956).

У 1944 році М. І. Корнфельд і Л. Суворов сформулювали гіпотезу про асиметричне схлопування бульбашок біля твердих меж, що спричиняє формування мікроструменів. Теоретичне обґрунтування запропонував Раттрей (1951), а експериментальне підтвердження надали Науде й Елліс (1961).

Подальші дослідження розвивалися у двох напрямках: аналіз динаміки окремих бульбашок (Релей, Блейк, Плессе) та вивчення розвинених кавітаційних структур з використанням теорії потенціального потоку (Гельмгольц, Тулін, Ву). Вихрова кавітація досліджувалась менш інтенсивно, однак внесок у її вивчення зробили Гену, Шахін і Ліньель у 1980-х роках.

Принцип дії кавітації у різноманітних випадках

Кавітація (від лат. *cavitas* – порожнеча, пустота) – це фізичне явище, що полягає в утворенні в рідкому середовищі порожнин, заповнених парою, газом або їх сумішшю. Ці порожнини, які ще називають кавітаційними бульбашками, є локальними зонами розриву суцільності рідини.

Кавітація виникає тоді, коли **локальний тиск** у рідині знижується до **критичного рівня** $p_{кр}$, наближеного до **тиску насиченої пари** цієї рідини при взятій температурі. Насичена пара – це пара, яка перебуває в динамічній рівновазі зі своєю рідиною. При цьому процес пароутворення дорівнює конденсації.

У реальних умовах це може відбуватися внаслідок:

- **Гідродинамічних ефектів** – при проходженні рідини через звуження або прискорення потоку, що спричиняє падіння тиску (гідродинамічна кавітація);
- **Дії інтенсивної акустичної хвилі** – під час фази розрідження в ультразвуковому циклі, коли створюються умови для утворення бульбашок (акустична кавітація).

Таким чином, кавітація – це результат критичного зниження тиску в рідкому середовищі, за якого з'являються нестабільні газо-парові утворення, що можуть зростати, рухатися та вибухати, впливаючи на фізико-хімічні процеси в системі.

В реальних умовах тиск, за якого фактично виникає кавітація, значною мірою визначається фізико-хімічними властивостями самої рідини. Зокрема, наявність у ній значної кількості розчинених газів, наприклад повітря, сприяє передчасному утворенню газових порожнин унаслідок десорбції, при цьому тиск усередині таких порожнин може бути вищим, ніж тиск насиченої пари.

Якщо в рідині присутні мікроскопічні газові або парогазові включення (бульбашки), які неможливо виявити візуально, процес кавітації може запускатися навіть при тисках, що перевищують рівень насиченого парового тиску. Утворення кожної кавітаційної бульбашки відбувається шляхом зростання з існуючого ядра, після чого вона руйнується – схлопується – під

дією оточуючого тиску. Цей цикл триває дуже короткий проміжок часу – на рівні мілісекунд. Якщо бульбашки виникають серіями з високою частотою, візуально вони можуть сприйматися як єдина кавітаційна каверна.

Гідродинамічна кавітація

У низці гідродинамічних ситуацій, що мають місце в замкнених трубопроводних системах, може спостерігатися процес, пов'язаний із фазовим переходом рідини: частина її переходить у парову фазу, при цьому відбувається десорбція розчинених газів.

Кавітація з точки зору гідродинаміки – це порушення суцільності потоку, пов'язане з локальним зменшенням тиску, що призводить до формування порожнин, заповнених паром і газами (каверн) [15].

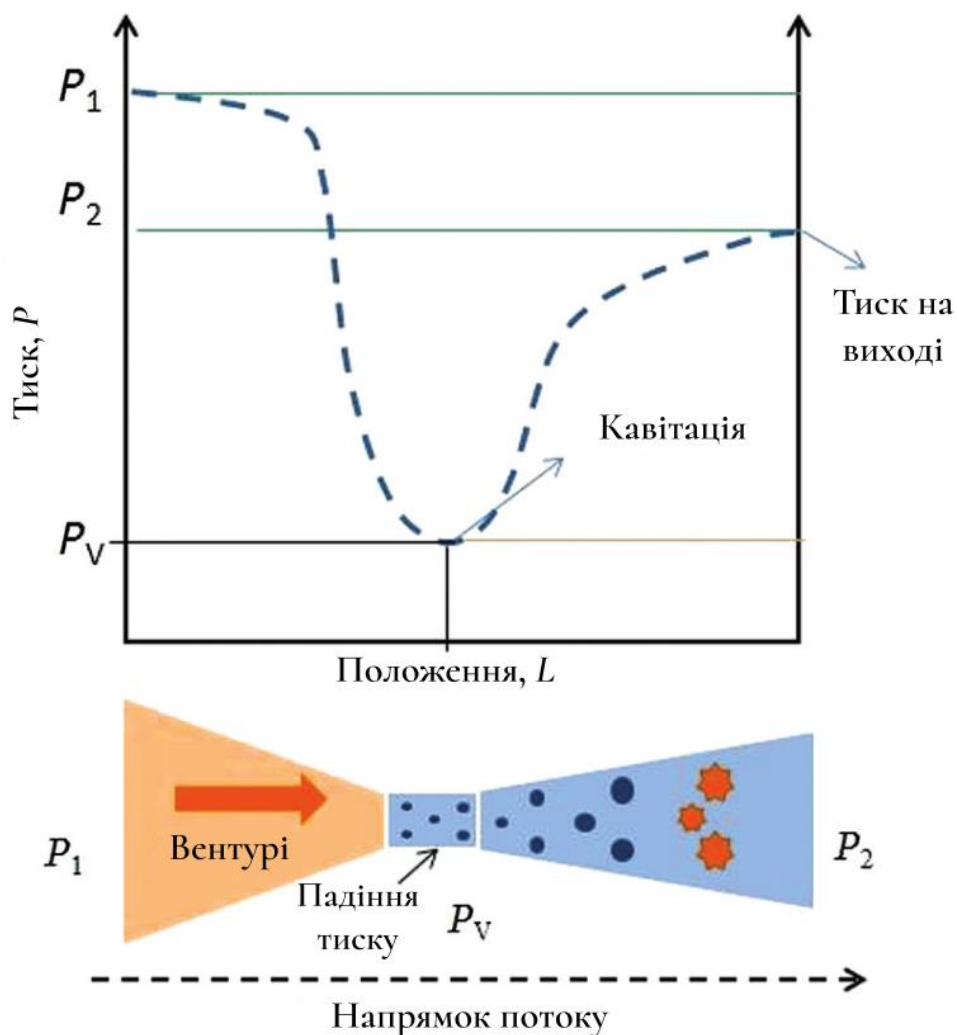


Рис. 3.1 – Схема функціонування трубки Вентурі для демонстрації кавітації [16]

Даний процес можна ілюструвати за допомогою простого експериментального стенду з трубопроводом, в якому розміщено прозору трубку Вентурі (рис. 3.1). Рідину примусово пропускають через спеціальні звуження, і в таких зонах частина потенційної енергії тиску перетворюється на кінетичну енергію руху, що спричиняє істотне зменшення локального тиску. Якщо тиск у найвужчій частині – у так званій **зоні веноконрактури** – падає нижче **тиску насиченої пари** рідини, відбувається миттєве утворення **парових порожнин (кавітуючих бульбашок)**, що і є початком процесу кавітації [16].

У середній частині трубки, яка має найменший діаметр, швидкість рідини різко зростає згідно з рівнянням безперервності, що призводить до інтенсивного зниження тиску за законом Бернуллі. Після проходження звуження рідина потрапляє у розширену частину трубопроводу. У цій зоні швидкість потоку знижується, а тиск частково відновлюється. Внаслідок цього утворені парові бульбашки схлопуються – тобто зазнають миттєвого руйнування, вивільняючи при цьому локально значну кількість енергії у вигляді **ударних хвиль, мікроструменів і високих температур**.

Вихідна частина трубопроводу часто супроводжується відшаруванням прикордонного шару рідини, що також призводить до постійної втрати тиску – частина енергії втрачається назавжди. Величина цього падіння тиску визначає **інтенсивність кавітації** та **ступінь турбулентності** (хаотичного руху рідини) у зоні після звуження.

Для кількісного опису умов виникнення кавітації використовується **безрозмірне число кавітації** C_V , яке враховує основні гідравлічні характеристики системи. Воно визначається наступним чином [16]:

$$C_V = \frac{P_2 - P_V}{\frac{1}{2} \rho V_0^2}, \quad (3.1)$$

де P_2 – тиск на виході із зони звуження,

P_V – тиск насиченої пари рідини при відповідній температурі,

V_0 – швидкість потоку в горловині (вентурі),

ρ – густина рідини.

Кавітація зароджується, коли це число досягає так званого *порогу виникнення кавітації* C_{Vi} . Ідеальною умовою для початку кавітації є $C_{Vi} = 1$, але суттєві кавітаційні ефекти зазвичай проявляються вже при значеннях $C_V < 1$.

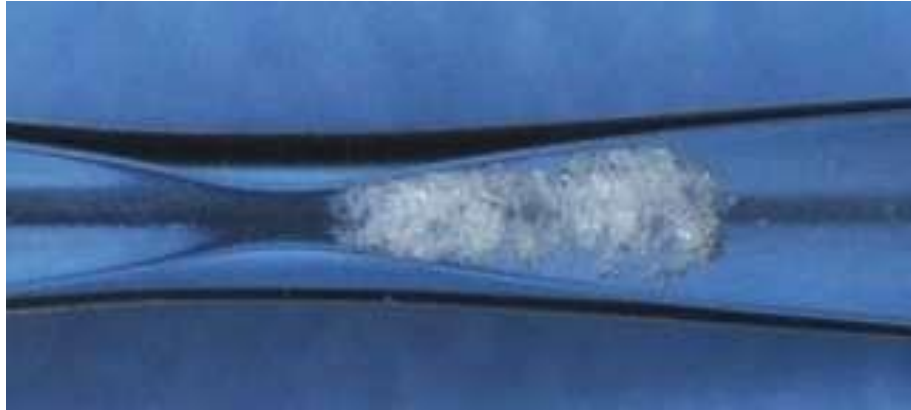


Рис. 3.2 – Наглядний приклад виникнення кавітації у трубі Вентурі

Суперкавітація (від лат. *super* – «над», *cavitas* – «порожнина») – це гідродинамічне явище, при якому в рідкому середовищі формується великомасштабна порожнина (*каверна*), яка охоплює весь або значну частину об'єкта, що рухається. Основною особливістю суперкавітації є те, що тіло переміщується переважно не в рідині, а в газовій або парогазовій порожнині, що значно знижує *гідродинамічний опір* та зменшує *кавітаційне зношування*.

Явище суперкавітації виникає, коли локальний тиск у зоні обтікання твердого тіла стає нижчим за тиск насиченої пари рідини, внаслідок чого утворюється розширена каверна.

В залежності від механізму утворення та підтримання каверни, розрізняють *два основні типи суперкавітації*:

1. **Парова (природна) суперкавітація** – каверна формується за рахунок інтенсивного випаровування рідини у зоні зниженого тиску, що виникає при високій швидкості обтікання. Всередині такої каверни переважає пара самої рідини. Такий режим є продовженням класичної кавітації, але з переходом у стаціонарний стан із великою стабільною порожниною.

2. **Штучна суперкавітація** – формується шляхом цілеспрямованої подачі газу у задню частину каверни або в область за тілом, що рухається. Газ підтримує порожнину у відкритому стані, навіть якщо умови тиску не забезпечують стабільного пароутворення. Такий тип активно застосовується в інженерії для контрольованого зменшення гідравлічного опору.

Акустична кавітація

Поширення ультразвукових хвиль у рідкому середовищі призводить до виникнення явища, відомого як **акустична кавітація**. Цей процес включає утворення, зростання (переважно під час фази розрідження – негативного тиску) та подальший раптовий колапс бульбашок під час фази стиснення (період позитивного тиску) [22].

Кавітаційні явища, спричинені ультразвуком, поділяють на **стабільну** та **тимчасову (перехідну) кавітацію**. При вищих частотах та низькому акустичному тиску (≤ 50 кПа) переважає **стабільна** форма, коли бульбашки не руйнуються, а лише періодично пульсують. Такі коливання викликають **мікрострумені**, створюючи слабе мікрозбудження в рідині навколо (рис. 3.3).

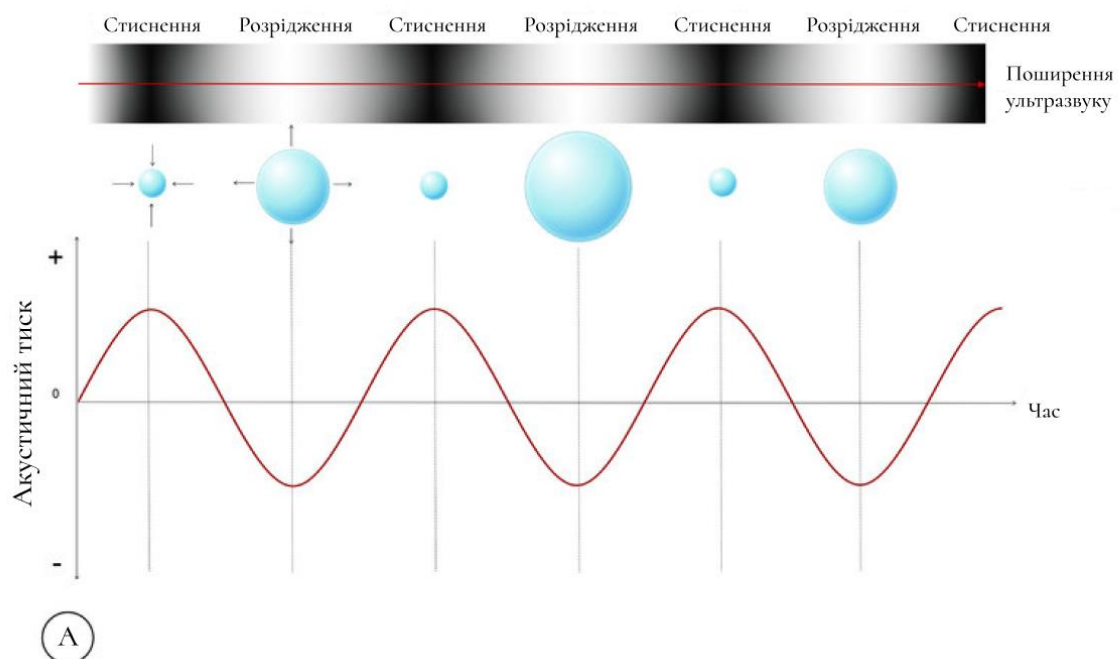


Рис. 3.3 – Схема стабільної кавітації [18]

Натомість низькочастотний ультразвук здебільшого генерує *тимчасову кавітацію* – короткоживучі бульбашки, які протягом кількох циклів швидко ростуть до критичного розміру й згодом зазнають вибухоподібного схлопування. Саме ця форма кавітації супроводжується найпотужнішими механічними та тепловими ефектами (рис. 3.4) [22].

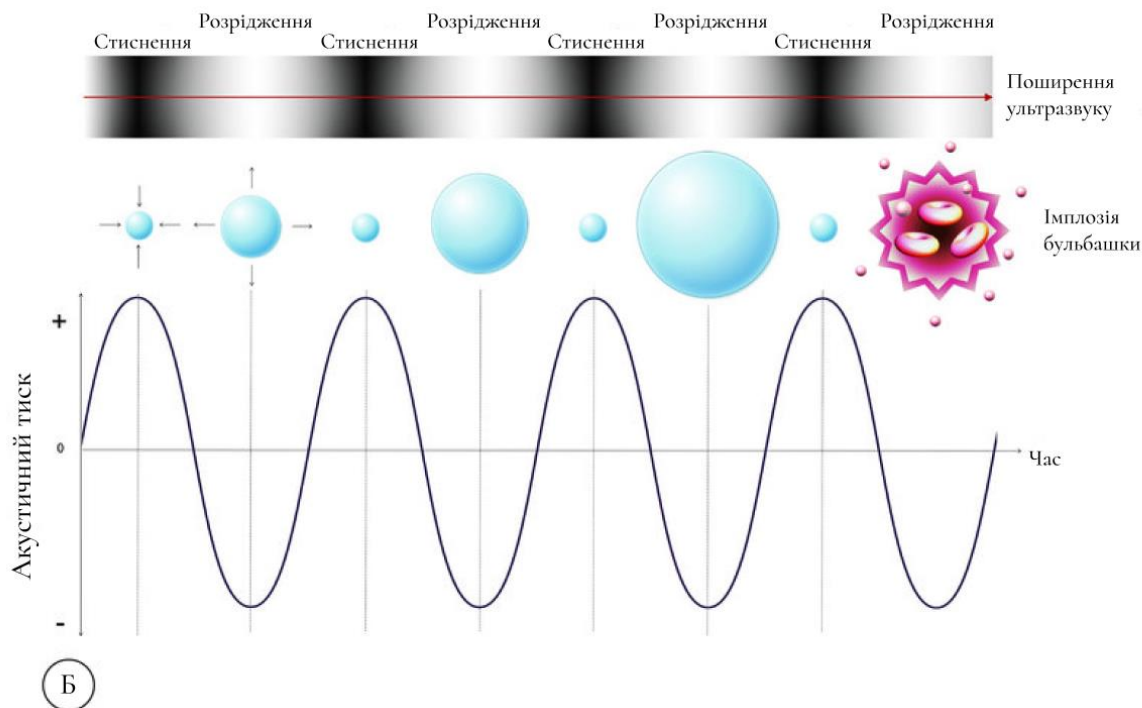


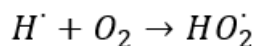
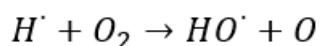
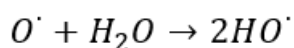
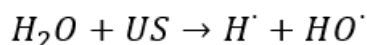
Рис. 3.4 – Схема тимчасової кавітації з імплізією бульбашок [17]

Імплозія кавітаційної бульбашки тимчасового типу супроводжується виникненням низки інтенсивних гідродинамічних ефектів, серед яких – *ударні хвилі*, *зсувні сили* та *мікрострумені високої швидкості*. Ці явища здатні легко руйнувати клітинні оболонки або розривати довгі молекулярні ланцюги полімерів.

Крім того, схлопування таких бульбашок призводить до локального підвищення температури до 5000 К (4726,85 °С) і тиску до 100 МПа (1000 атм) з подальшим охолодженням зі швидкістю 9 К/с, що спричиняє розпад або піроліз (розкладання органічних природних сполук (деревини, нафтопродуктів тощо) за нестачі кисню) летких речовин і органічних забруднювачів, які опиняються всередині бульбашки [22].

У результаті термічної дисоціації молекул водяної пари та кисню всередині кавітаційної бульбашки в умовах високої температури утворюються **високоактивні радикали** (атом, молекула або іон, який має непарні валентні електрони або відкриту електронну оболонку), зокрема $H\cdot$, $H_2\cdot$ та $OH\cdot$. Ці первинні продукти **сонолізу** ініціюють подальші хімічні реакції з розчиненими у воді органічними або неорганічними сполуками, що супроводжується процесами **гідроксилювання** (реакція заміщення атомів або груп атомів гідроксильною групою) та **окиснення** (процес віддачі електронів атомами, йонами або молекулами).

Механізм утворення радикалів у процесі **сонолізу води** описується наступними реакціями (US – ultrasound) [22]:



В абсолютно чистій воді без домішок вірогідність появи явища кавітації близька до нуля, так як для формування кавітаційних бульбашок необхідне якесь ядро для зародження процесу, що сильно спрощує виникнення акустичної кавітації. При додаванні у рідину наночастинок (НЧ) вони можуть виступати як переважні центри зародження кавітаційних бульбашок, особливо на межах поділу фаз або твердих поверхнях [19].

Нуклеація – це початковий етап утворення нового фазового стану, наприклад, бульбашок у рідині, кристалів із розчину, або крапель при конденсації. **Гомогенна нуклеація** – це спонтанне зародження нової фази всередині однорідного середовища, без участі сторонніх поверхонь. Наприклад, у дуже чистій воді з мінімальними домішками, нагрітій понад 100 °С без домішок, може не з'являтися пара доти, поки рідину не струсити – тобто дати певне збурення ззовні. **Гетерогенна нуклеація** відбувається, коли зародження нової фази полегшується на поверхнях сторонніх тіл: мікропорах, стінках

посудини, наночастинках в середовищі тощо. Наприклад, кипіння води найперше починається на шорстких стінках чайника – саме там виникають бульбашки пару.

Явище кавітації також напряму пов'язане з механізмом нуклеації. **Гетерогенна нуклеація** знижує енергетичний бар'єр для формування кавітацій, у порівнянні з **гомогенною нуклеацією** в об'ємі рідини. Завдяки цьому ефективність утворення бульбашок зростає, що своєю чергою посилює **інтенсивність** кавітаційних ефектів і збільшує генерацію активних форм кисню (ROS) [19].

Залежність між максимальними енергетичними бар'єрами гетерогенної ΔG_{het} та гомогенної ΔG_{hom} нуклеації описується наступним рівнянням:

$$\Delta G_{het} = \frac{16\pi\sigma^3}{3P^2} \cdot f(\theta) = \Delta G_{hom} \cdot f(\theta), \quad (3.2)$$

де σ – поверхневий натяг води;

P – сума тисків: газу, що захоплений у порожнині, пари рідини та акустичного тиску в період розрідження;

θ – контактний кут;

$f(\theta) = \frac{2+3 \cos(\theta)-\cos^3(\theta)}{40}$ – геометричний фактор.

Гетерогенна нуклеація є найімовірнішою на **гідрофобних** твердих поверхнях, для яких кут змочування θ перевищує 90° . Це сприяє формуванню каверн навіть за умов, де гомогенна кавітація була б малоімовірною [19].

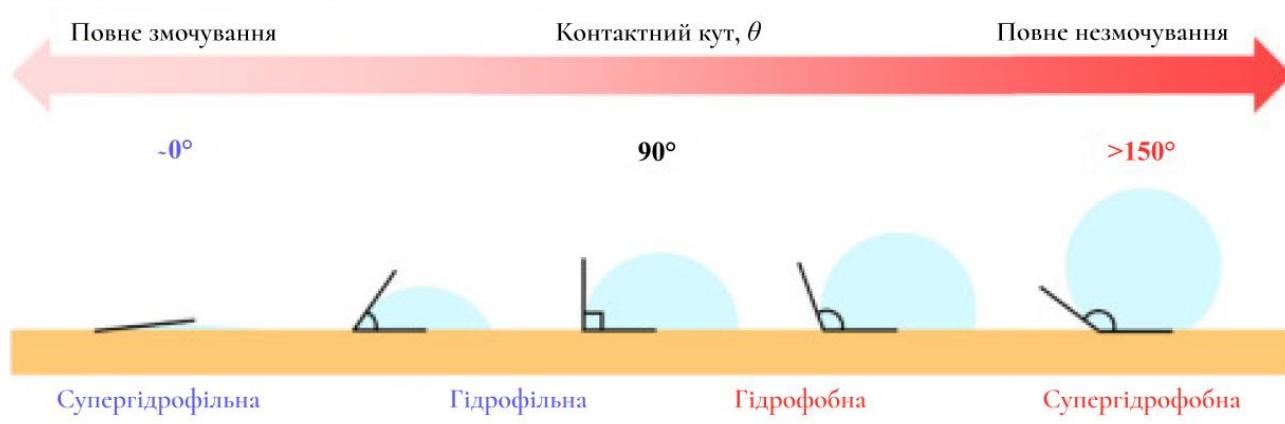


Рис. 3.5 – Діапазон контактного кута θ

Кут змочування також залежить від геометрії наночастинки, зокрема від її радіусу кривизни, розміру, шорсткості та наявності пор. Зокрема, у випадку субмікронних частинок (менше 1 мкм), контактний кут θ зазвичай є більшим, ніж у частинок більшого розміру, що збільшує ймовірність утворення бульбашок саме на дрібних наночастинках [19].

Також варто враховувати, що ефективність кавітації в присутності наночастинок додатково залежить від *частоти ультразвуку* або довжини хвилі звукового сигналу, що впливає на взаємодію хвилі з нанорозмірними центрами нуклеації.

Формування активних форм кисню під дією ультразвуку в рідких середовищах із твердими фазами відбувається завдяки сукупності фізико-хімічних ефектів, серед яких ключовими є *соноп'єзоелектричний ефект* і явище *сонолюмінації* [19].

Соноп'єзоелектричний ефект полягає у виникненні електричного заряду на поверхні п'єзоелектричних частинок (наприклад, BaTiO₃, ZnO, MoS₂) у відповідь на механічні коливання, зумовлені ультразвуком. Ці коливання викликають періодичну деформацію кристалічної ґратки, що генерує локальне електричне поле. У водному середовищі таке поле може спричинити розрив молекул води й утворення *гідроксильних ($\bullet\text{OH}$)* і *супероксидних ($\bullet\text{O}_2^-$)* радикалів, які є основними видами ROS.

Сонолюмінація – це випромінювання світла під час схлопування кавітаційних бульбашок. При екстремально високих температурі і тиску відбувається збудження електронів у напівпровідникових або люмінесцентних наночастинках (так званих *сонолюмінесцентних сенсibilізаторах*). Це збудження, у свою чергу, запускає фотохімічні реакції, що супроводжуються утворенням ROS [19].

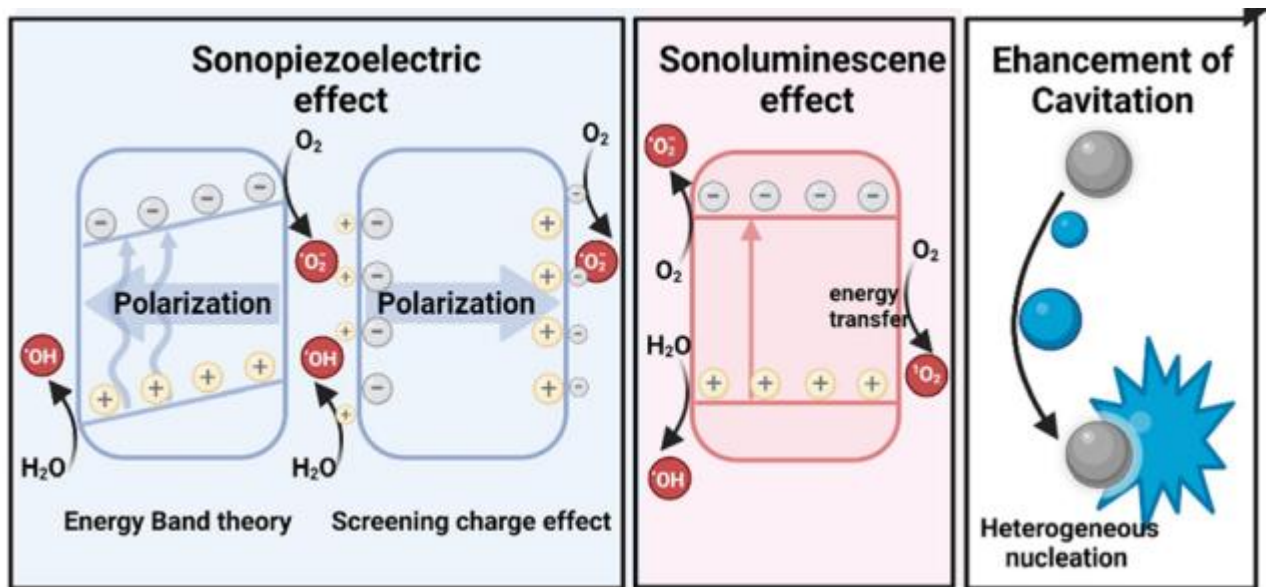


Рис. 3.6 – Схематичне зображення соноп'єзоелектричного та сонолюмінесцентного ефектів, а також гетерогенної нуклеації [19]

Інтенсивність кавітаційних процесів визначається низкою фізичних чинників, серед яких ключову роль відіграють *частота ультразвуку, амплітуда коливань, тиск, в'язкість та концентрація розчинених газів* [20].

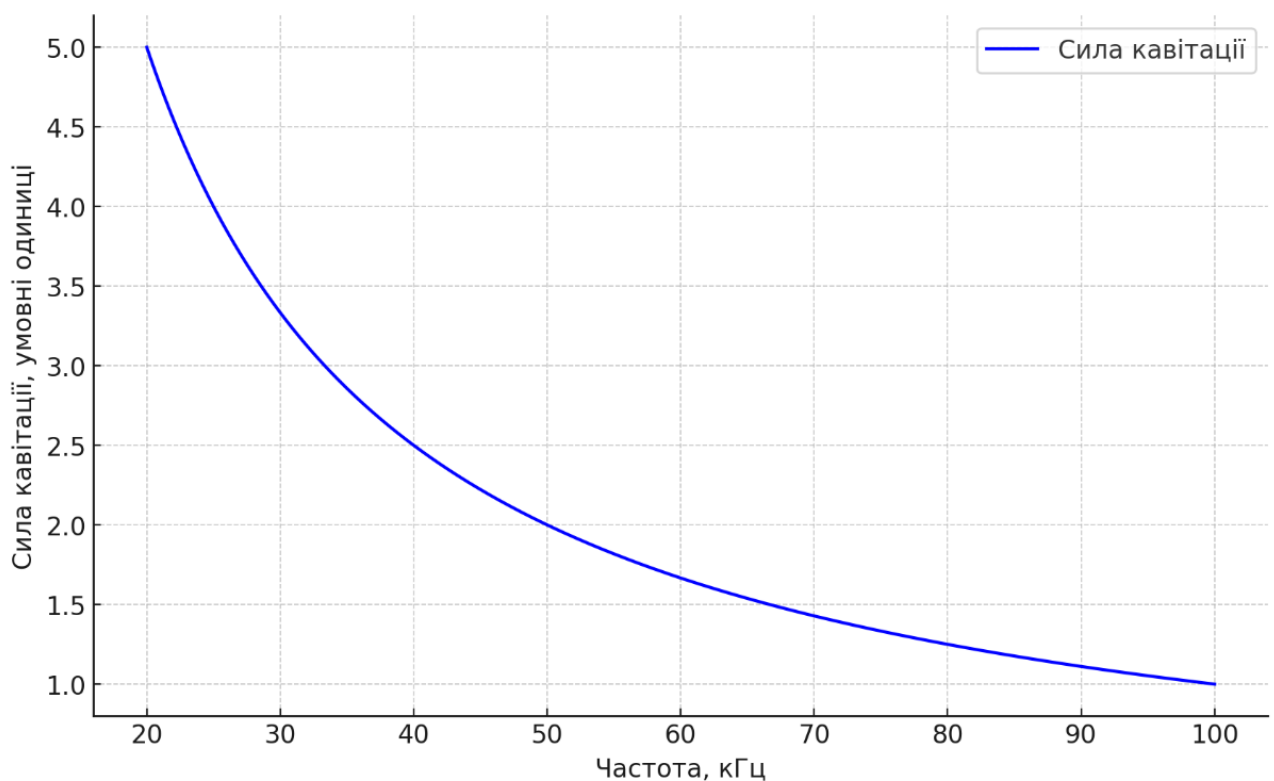


Рис. 3.7 – Графік залежності сили кавітації у воді в залежності від частоти [20]

Графік відображає зміну інтенсивності кавітаційного ефекту залежно від *частоти* в діапазоні 20–100 кГц. Із підвищенням частоти сила окремих схлопувань зменшується, проте зростає їх кількість за одиницю часу. Це створює компроміс між локальною енергією та загальним ефектом. Вибір частоти залежить від характеру завдання: низькі частоти ефективні для інтенсивного руйнування, а високі — для делікатного впливу.

Низькочастотний діапазон (20–30 кГц) характеризується високою енергією схлопування, оскільки бульбашки мають більше часу для росту. Це забезпечує сильний кавітаційний вплив, доцільний для грубого очищення та деструктивних процесів.

Середні частоти (30–60 кГц) забезпечують компроміс між силою й кількістю подій. Хоч окремі імпульси слабші, їх більша кількість підвищує рівномірність обробки, що корисно для очищення поверхонь або обробки м'яких матеріалів.

Високочастотна область (60–100 кГц) створює м'яку, але щільну кавітацію. Через швидке схлопування бульбашки не встигають набрати великі розміри, однак ефект залишається стабільним і контрольованим. Такий режим підходить для чутливих процесів у біомедичних або тонкошарових системах.

Зростання *тиску* ускладнює утворення бульбашок, обмежуючи їхній розмір і життєвий цикл через необхідність більшого зниження тиску до необхідної величини для початку процесу.

Температура є критичним фактором, що опосередковано впливає на розвиток кавітаційних явищ через зміну в'язкості рідини. Зі зростанням температури кінетична енергія молекул збільшується, що призводить до ослаблення міжмолекулярних взаємодій і, як наслідок, до зменшення в'язкості води. Зниження в'язкості сприяє швидшому переміщенню молекул і меншому гасінню коливань, завдяки чому кавітаційні бульбашки можуть формуватися та рости інтенсивніше. Таким чином, підвищення температури загалом сприяє активнішому перебігу кавітаційного процесу, посилюючи ефекти ультразвукового впливу [20].

В'язкість води суттєво знижується з підвищенням температури: наприклад, при 0 °С вона становить 1.79 мПа·с, а при 60 °С – лише 0.47 мПа·с. Це створює сприятливі умови для кавітації, оскільки зменшується опір рідини до утворення й динаміки бульбашок. Знання цієї температурно-в'язкісної залежності є важливим для оптимізації ультразвукових процесів очищення та знезараження.

Наявність *розчинених газів* у воді (зокрема кисню або азоту) істотно впливає на ймовірність виникнення кавітації, оскільки знижує тиск насичення. При зменшенні концентрації таких газів підвищується стабільність рідини, що ускладнює формування кавітаційних бульбашок. Отже, вміст газів визначає критичні умови кавітаційного зародження [20].

Застосування акустичної кавітації на практиці

Ультразвукова кавітаційна обробка рідких середовищ знаходить широке застосування в різних промислових технологіях. Вона ефективна у процесах змішування, диспергування рідких і твердих речовин, формування прямих і зворотних емульсій, а також у розділенні неоднорідних рідин, центрифугуванні, флотації та фільтрації [21].

Кавітаційний ефект дозволяє суттєво впливати на швидкість дифузії, процеси окислення, кристалізацію та розчинення речовин, а також активізує низку хімічних реакцій і фізичних явищ. У результаті досягається значне підвищення ефективності та швидкості технологічних операцій.

Основні напрямки застосування кавітації:

1. Знезараження води та рідин

Руйнування клітинних стінок мікроорганізмів завдяки мікроструменям, ударним хвилям і локальному перегріванню – знищення частинок, що лишаються у воді після попередньої очистки. Кавітація сприяє утворенню мікропухирців, які покращують видалення завислих речовин з води.

2. Аерація

Поліпшення розчинення газів (переважно кисню) у воді завдяки акустичним потокам та мікротурбулентності. Застосовується у біореакторах і акваріумах для насичення води активними газами (O_2 , O_3 , CO_2).

3. Дегазація

Видалення розчинених газів з рідини шляхом їх захоплення й вивільнення під час кавітації. Застосовується у лабораторіях, хімічному виробництві, при аналізі води та розчинів.

4. Сонохімія та сонокаталіз

Активізація хімічних реакцій у рідких середовищах за допомогою кавітаційних процесів. Використовується для синтезу наноматеріалів, каталізу, окиснення, полімеризації, також для розщеплення складних молекул (наприклад, фенолів, барвників, ПАВ, фармацевтичних залишків).

5. Емульгування та диспергування

Створення дрібнодисперсних емульсій або суспензій за рахунок зсувних сил кавітації. Використовується в косметичній, харчовій, фармацевтичній та хімічній промисловості.

6. Інтенсифікація біопроцесів

Передобробка біомаси перед ферментацією (наприклад, у виробництві біогазу). Руйнування клітинних стінок водоростей або бактерій для вивільнення нутрієнтів.

Знезараження води УЗ кавітацією

Бактерицидна дія ультразвукової кавітації реалізується через низку фізичних і хімічних механізмів. По-перше, при колапсі кавітаційної бульбашки, що виникає в безпосередній близькості до мікроорганізму або всередині нього, формується кумулятивний мікрострумінь, здатний механічно руйнувати клітинні структури. По-друге, схлопування бульбашки супроводжується локальним сплеском температури, який може досягати тисяч градусів, що викликає термічне пошкодження мікроорганізмів. Третій чинник полягає у

різниці тисків уздовж тіла мікроорганізму в полі стоячої ультразвукової хвилі, що спричиняє деформацію клітинної оболонки. Нарешті, активізуються окислювальні реакції внаслідок утворення вільних радикалів (зокрема $OH\cdot$) та посилюється мікрмасообмін, що додатково сприяє хімічному руйнуванню патогенних агентів [21].

Ефективність дезінфекції значною мірою залежить від типу мікроорганізмів, фізичних параметрів ультразвуку (зокрема частоти та інтенсивності), а також часу впливу. До ультразвуку чутливі як грампозитивні, так і грамнегативні аеробні бактерії, включаючи коки, бацили та інші морфологічні типи. Особливо легко піддаються дії нитчасті форми, у той час як сферичні клітини виявляють вищу стійкість. Ультразвук успішно діє як на вегетативні, так і на спорові форми мікроорганізмів.

Серед основних переваг цього методу варто відзначити [21]:

- відсутність необхідності видалення залишкових продуктів хімічних реакцій, оскільки знезараження здійснюється без додавання реагентів;
- усунення потреби в поводженні з токсичними речовинами, їх зберіганні та транспортуванні;
- зменшення експлуатаційних витрат завдяки відсутності постійної потреби в закупівлі реагентів;
- можливість експлуатації обладнання без залучення висококваліфікованого персоналу;
- довговічність кавітаційних систем за умови виготовлення з матеріалів, стійких до кавітаційного навантаження, та їхня стабільна ефективність упродовж тривалого часу;
- здатність систем працювати як у проточному, так і в об'ємному режимі, що забезпечує гнучкість застосування;
- незалежність ефективності обробки від фізико-хімічного складу чи прозорості рідини;
- відсутність накипоутворення на внутрішніх поверхнях апарата, завдяки руйнуванню кристалічної структури солей у кавітаційному полі;

- можливість поєднання з фільтраційними системами – за рахунок дії кавітації фільтруючі елементи самоочищуються, підтримуючи постійну пропускну здатність.

Ефективність інактивації мікроорганізмів прямо залежить від *інтенсивності ультразвукового впливу*. Дані експериментальних досліджень свідчать, що для досягнення високої ступені знезараження інтенсивність повинна перевищувати **20–30 Вт/см²**. При низьких значеннях (менше **2 Вт/см²**) спостерігалось навіть *підвищення активності росту* мікроорганізмів, що свідчить про необхідність дотримання певного енергетичного порогу для забезпечення бактерицидного ефекту [21].

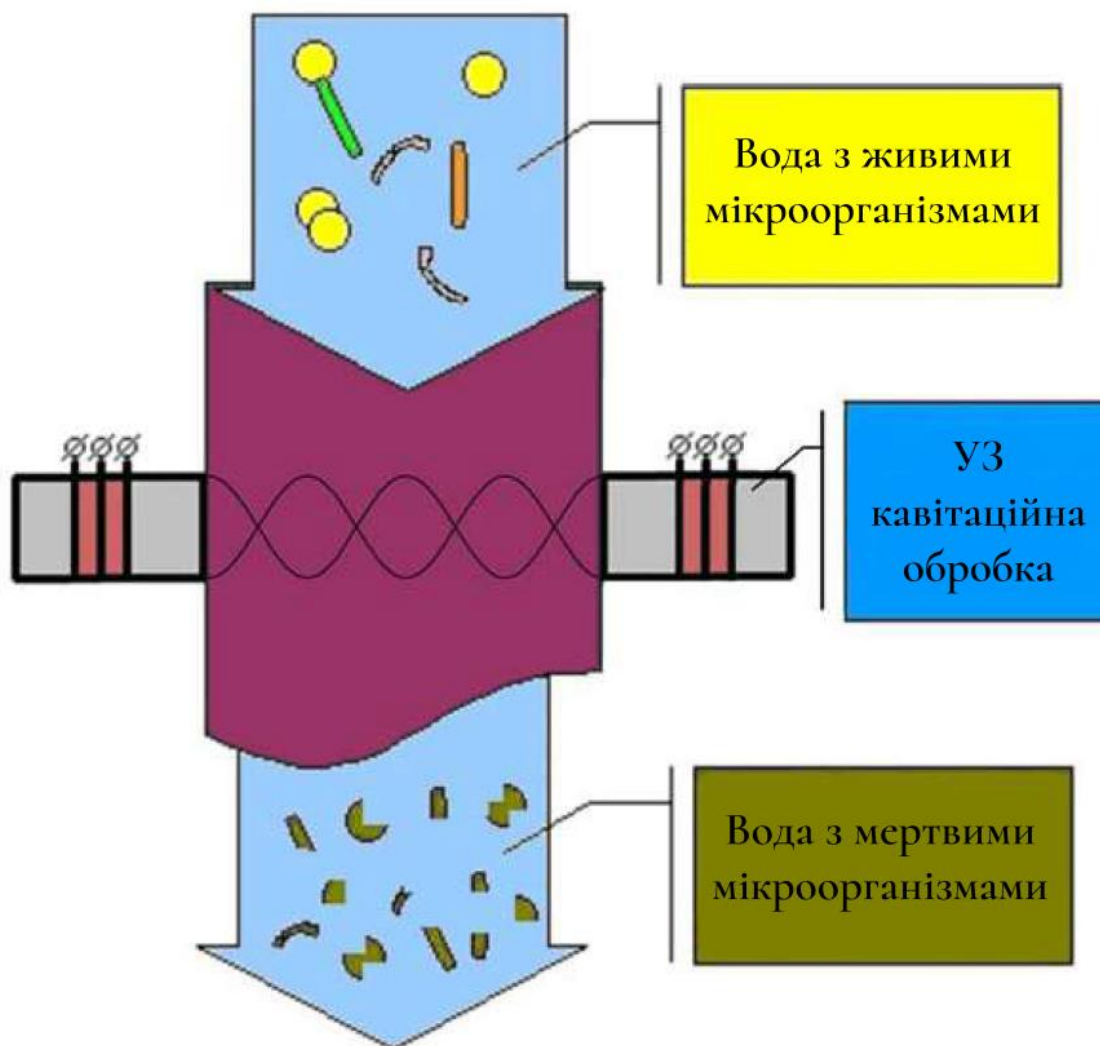


Рис. 3.8 – Схема знезараження рідких середовищ способом ультразвукової кавітації [21]

Оскільки кавітаційні явища лежать в основі ультразвукового знезараження рідин, постає завдання створення апаратури, здатної вводити в середовище акустичну енергію з інтенсивністю понад **30 Вт/см²** і питомою енергією понад **0,2 Вт/см³**. Таке обладнання повинно відповідати низці технічних вимог [21]:

- стабільне утворення *розвиненої кавітації* в усьому робочому об'ємі камери;
- ефективне *введення та концентрація енергії ультразвуку* в рідині;
- *надійність* роботи кавітаційної камери та випромінювачів у резонансному режимі;
- можливість використання *додаткових методів підсилення кавітації*, зокрема: підвищення статичного тиску, штучне введення центрів кавітації, регулювання температури або імпульсна модуляція сигналу.

Для практичного впровадження таких процесів доцільно використовувати *відкриті тонкостінні кавітаційні ванни*, де кавітація збуджується за допомогою *малоамплітудних 1/2-хвильових приводів-випромінювачів*, змонтованих на дні або стінках ванни. Невелика товщина стінок запобігає збудженню паразитних згинальних коливань, а конічна форма активної частини випромінювача сприяє ефективному узгодженню акустичного навантаження. Завдяки цьому на випромінювальній поверхні не формується двофазний прошарок, який би поглинав або розсіював ультразвук, що дозволяє зменшити акустичні втрати та підвищити енергоефективність процесу.

В таких ваннах доцільно забезпечувати інтенсивність ультразвуку на рівні **8–10 Вт/см²**, що є оптимальним для стабільної генерації кавітаційного поля в рідких середовищах [21].



а)



б)

Рис. 3.9 – Кавітаційна ванна з $\frac{1}{2}$ - хвильовими резонансними приводами- випромінювачами на донній поверхні (а) та всіх поверхнях (б) [21]

Дегазація і аерація УЗ кавітацією

Кисень, розчинений у водному середовищі, надходить із двох основних джерел [17]:

- з атмосфери через поверхню води;
- у процесі *фотосинтезу*, коли водорості та інші фотосинтетичні організми синтезують органічні сполуки (вуглеводи) з неорганічних компонентів (зокрема CO_2 та H_2O), виділяючи при цьому молекулярний кисень.

У складі одного літра звичайної водопровідної води зазвичай міститься від 2,5 до 3,5 мілілітрів розчиненого кисню. У чистих природних водотоках, таких як гірські річки або джерела, концентрація кисню може сягати 20 мл/л. Натомість у водоймах, забруднених органічними або промисловими стоками, вміст кисню може бути вкрай низьким або повністю відсутнім через підвищене біологічне споживання.

Так звана «киснева вода» є прикладом двофазної системи, де газоподібний компонент (O_2) розчинений у рідкому середовищі – воді (H_2O). За стандартних умов (температура 20 °С, атмосферний тиск) максимальна розчинність кисню у воді становить приблизно 31 мл/л. Проте в умовах підвищеного тиску цей показник може значно збільшуватися.

На практиці кисневу воду виробляють за аналогією з газованими напоями – але замість вуглекислого газу (CO_2) в рідину під тиском вводиться

молекулярний кисень. Після насичення вода герметично закупорюється. Деякі виробники повідомляють про вміст до 90 мл O₂ на літр готового продукту, що значно перевищує рівні, які можливі при природному насиченні.

Ультразвукова дегазація та деаерація є ефективною альтернативою традиційним методам видалення газів із рідин, таким як кип'ятіння, вакуумування чи продування інертним газом.

Принцип дії ультразвукової дегазації ґрунтується на акустичній кавітації: при введенні потужних ультразвукових хвиль у рідину виникають чергування зон високого й низького тиску. У фазі розрідження утворюються мікропорожнини – кавітаційні бульбашки, які зростають, поглинаючи розчинені гази з рідини. Зростаючі газові бульбашки, а також викликані ультразвуком **мікрострумені та турбулентність**, сприяють їх злиттю в більші бульбашки, які швидко піднімаються до поверхні і залишають рідину. Таким чином, процес забезпечує **інтенсивний масообмін та ефективне газовиведення** без потреби у нагріванні чи вакуумі.

Аерація з використанням ультразвукової кавітації – це процес насичення рідини (переважно води) газами, зокрема киснем, за допомогою кавітаційних ефектів, які виникають під дією ультразвукових хвиль.

В зоні низького тиску утворюються й ростуть кавітаційні бульбашки. Якщо поруч наявні газові бульбашки або вводиться зовнішній газ, він ефективно втягується в рідину. Під час схлопування бульбашок виникають мікрострумені та мікротечії, які значно підсилюють **локальний масообмін** між газом і рідиною. Великі бульбашки, які погано розчиняються, дробляться на дрібніші (мікробульбашки), що мають більшу площу поверхні, сприяючи швидшому розчиненню газу.

Щоб прискорити процес та підвищити ефективність аерації зазвичай застосовують наступні способи:

- В систему спеціально подається газ (кисень чи озон, через мікропористий елемент або знизу камери);

- Рідина активно переміщується ультразвуком, тобто відбувається розчинення мікробульбашок газу;

- Газ інжектуються напряму в зону кавітації, таким чином підвищуючи ступінь насичення киснем.

Негативні сторони використання ультразвукових хвиль та кавітації

З технічної точки зору вона є небажаним явищем, оскільки викликає деградацію компонентів гідросистем – трубопроводів, клапанів, дроселів, насосів та турбін. Її вплив веде до зниження ефективності роботи обладнання, підвищеного зносу і навіть руйнування конструкцій.

При русі кавітаційної бульбашки до зони з підвищеним тиском, вона руйнується, утворюючи імпульсну хвилю, еквівалентну гідравлічному удару. Це викликає локальні пошкодження матеріалу – так звану кавітаційну корозію. Остання є поєднанням дії імпульсного тиску, спричиненого колапсом бульбашок, і корозійного впливу середовища, що призводить до ерозійного зношування поверхонь [15].

Кавітація також спричиняє розвиток вібраційних коливань, що негативно впливає на стабільність роботи гідромеханічних систем. Її поява в насосному обладнанні, зокрема, пов'язана зі зниженням тиску на вхідному отворі агрегату. У лопатевих насосах це явище призводить до часткового заповнення об'єму робочого колеса паровими порожнинами, що зменшує корисну подачу, напір, споживану потужність і коефіцієнт корисної дії пристрою. В результаті спостерігається загальне зниження ефективності функціонування насосів і турбін у гідросистемах.

3.2 Розроблення методів та пристроїв ультразвукового очищення води

Лабораторна установка для ультразвукової кавітаційної обробки води створена з метою вивчення процесів дегазації, знезараження, аерації та інтенсифікації масообміну в рідкому середовищі. У сучасних умовах гострої потреби в екологічно чистих, ефективних і безреагентних технологіях обробки води така установка становить значний науковий та практичний інтерес. Вона дозволяє не лише вивчати ефекти кавітації, а й регулювати її інтенсивність, частоту, вплив температури та зовнішніх впливів.

Складові установки та функціональні вузли:

1. Генератор сигналу Rohde&Schwarz SML01
2. Підсилювач потужності E&I 2100L
3. П'єзоперетворювач 4GL-3840
4. Частотомір ЧЗ-64/1
5. Вольтметр В7-34А
6. Осцилограф DSO4254В
7. Термостат-циркулятор Inkbird ISV-200W

Також опціонально можна використовувати оксиметр – електрохімічний або оптичний прилад, призначений для вимірювання концентрації розчиненого кисню у воді. Найпоширеніший тип – полярографічний датчик Кларка . Принцип дії даного датчика:

- Кисень, що дифундує крізь киснепроникну мембрану, відновлюється на катоді (зазвичай платиновому). Одночасно на аноді (наприклад, срібному) відбувається окиснення.

- У результаті цих реакцій формується електричний струм, пропорційний кількості розчиненого O_2 . Сигнал перетворюється в цифрове значення у мг/л або % насичення.

В даній установці прилад не використовується. Приймається, що насичення води киснем відповідає стандартному значенню за нормальних умов.

Підключення компонентів:

1. Генератор сигналу Rohde&Schwarz SML01

- Встановити синусоїдальний сигнал частотою 40 кГц.
- Вихідний роз'єм генератора (BNC) з'єднати коаксіальним кабелем із входом підсилювача E&I 2100L.
- Амплітуда сигналу на виході генератора – приблизно 0.15–0.2 В.

2. Підсилювач потужності E&I 2100L

- Призначений для посилення сигналу до необхідної потужності (~50 Вт).
- Вихід з підсилювача підключити через т-подібний розгалужувач:
 - перший канал – до осцилографа **DSO4254B** (для контролю сигналу);
 - основний вихід – до п'єзоперетворювача **4GL-3840**.

3. П'єзоперетворювач 4GL-3840 60 Вт, 40 кГц

- Приєднаний до дна ванни з нержавіючої сталі, який служить дном робочої ємності. У ванни має бути вирізане дно для покращення проникності УЗ хвиль, а п'єзоперетворювач з'єднується з ванною напряду через тонкий шар (1 мм) епоксидного клею (наприклад, ES-508).
- П'єзоелемент фіксується через механічний або клейовий контакт з дном металеві ванни (форму стакану).
- Кабель живлення (екранований, 50 Ом) під'єднано від виходу підсилювача безпосередньо до контактів перетворювача.

4. Частотомір ЧЗ-64/1

- З'єднаний паралельно до виходу генератора або до входу підсилювача (для точного налаштування робочої частоти).

5. Вольтметр В7-34А

- З'єднаний паралельно до виходу генератора або до входу підсилювача (для точного налаштування робочої напруги).

6. Ванна

- 250 мл води, припустима наявність наночастинок що вказували б на наявність забруднень. Початкова температура згідно нормальних умов – 20 °С.

7. Термостат-циркулятор Inkbird ISV-200W

Пристрій живиться окремо від основної лінії приладів, напряду від мережі ~220 В. Циркулятор встановлюється в боковій або верхній частині ванни, з можливістю обтику рідини навколо зони п'єзоперетворювача.

Функціональні схеми лабораторної установки та фактичної моделі для очищення води в реальних умовах представлені в графічній частині.

Перетікання експерименту:

1. Генератор сигналу Rohde&Schwarz SML01

Роль у системі:

Формує синусоїдальний електричний сигнал з чітко заданою частотою – резонансною частотою п'єзоперетворювача.

Фізичне значення:

Це джерело збуджувального електричного поля, яке викликає змінну деформацію п'єзоелемента через зворотний п'єзоэффект. Точність частоти тут критично важлива – навіть невеликі відхилення знижують ефективність резонансного збудження і відповідно – інтенсивність кавітації.

2. Підсилювач потужності E&I 2100L

Роль у системі:

Підсилює слабкий сигнал з генератора до енергетично значущого рівня, необхідного для збудження УЗ-хвиль у рідині.

Фізичне значення:

Потужність сигналу, що подається на п'єзоперетворювач, безпосередньо визначає амплітуду його механічних коливань та, відповідно, інтенсивність акустичного поля. Чим вища подана електрична потужність, тим сильніше

п'єзоелемент деформується, тим більше енергії передається в рідину, і тим інтенсивніше явище кавітації.

3. П'єзоперетворювач 4GL-3840 60 Вт / 40 кГц

Роль у системі:

Це центральний вузол, який перетворює електричну енергію на механічну. Завдяки зворотному п'єзоєфекту він генерує високочастотні вібрації, що збуджують ультразвукові хвилі в рідкому середовищі.

Фізичне значення:

Ефективність перетворення залежить від:

- п'єзомодуля (d_{33}),
- резонансної частоти,
- З'єднання тіл (в цьому випадку – ванни з самим п'єзоперетворювачем).

4. Металева ванна (250 мл, форма стакан)

Роль у системі:

Є акустичним навантаженням для ПЕП і резонатором, що передає УЗ-хвилі у рідину.

Фізичне значення:

- Завдяки механічному контакту з п'єзоелементом, коливання передаються на дно ємності, збуджуючи в рідині поздовжні акустичні хвилі.
- Геометрія впливає на фокусування кавітації: вузьке дно концентрує енергію ближче до зони генерації.

5. Частотомір ЧЗ-64/1

Роль у системі:

Служить для точного контролю робочої частоти, необхідної для узгодження генератора з резонансом ПЕП.

Фізичне значення:

Збереження сталої частоти під час експерименту неймовірно важливо. Зміни призведуть до варіації амплітуди механічних коливань, а отже – до погіршення результатів очікуваного явища кавітації.

6. Осцилограф DSO4254B

Роль у системі:

Дозволяє візуально спостерігати сигнал, перевіряти його форму, чистоту, частоту та стабільність.

Фізичне значення:

- Наявність шумів, гармонік або нестабільностей сигналу прямо впливає на стабільність кавітації.
- Осцилограф дозволяє виявити відхилення від нормальної роботи, наприклад перегрів ПЕП, втрату контакту тощо.

7. Термостат-циркулятор Inkbird ISV-200W

Роль у системі:

Підтримання оптимальної температури для максимальної ефективності кавітації. Після увімкнення спрацьовує циркуляційний насос, що рухає воду, запобігаючи перегріву окремих ділянок

Фізичне значення:

- підтримує стабільну температуру рідини в межах заданого діапазону;
- забезпечує примусову циркуляцію рідини у ванні, що вирівнює температуру по всьому об'єму;
- запобігає локальному перегріванню в зоні кавітації.

8. ВЧ-вольтметр В7-34А

Роль у системі:

Вимірює реальну напругу на п'єзоелементі в діапазоні високих частот.

Фізичне значення:

Дозволяє розрахувати фактичну подану потужність на підсилювач для запобігання перенавантаженню через формулу:

$$P = \frac{U^2}{R}, \quad (3.3)$$

де $R = 50 \text{ Ом}$.

Також доцільно розрахувати деякі додаткові параметри як інтенсивність акустичних хвиль та густину потужності (щільність енергії) у воді за експерименту.

Інтенсивність – це кількість енергії, що проходить через одиницю площі за одиницю часу (формули 2.32-2.33). У даному контексті – це потужність, розподілена по площі випромінювання:

$$I = \frac{P}{A}, \quad (3.4)$$

де P – загальна потужність випромінювання (Вт),

A – площа поверхні, через яку енергія передається (м^2).

Після підставлення значення площі дна посудини (або площі електроакустичного випромінювача) $A = \pi r^2 = \pi \cdot 0,025^2 = 1,963 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$, отримується наступне значення:

$$I = \frac{50}{1,963 \cdot 10^{-3}} = 25469 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

Для практичних вимірювань часто використовують пов'язане значення:

$$I = 25469 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} = 2,5469 \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2}.$$

Густина потужності (або енергетична щільність за одиницю часу) – це кількість енергії, яка вноситься в об'єм за секунду (формули 2.29-2.31). Для цього випадку формула показує величину потужності, що припадає на одиницю об'єму.

$$\rho_E = \frac{P}{V}, \quad (3.5)$$

де V – об'єм, в якому ця потужність поширюється (м^3).

Підставляючи значення об'єму рідини, в якому поширюються ультразвукові хвилі $V = 250 \text{ мл} = 2,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$, формула виглядатиме так:

$$\rho_E = \frac{50}{2,5 \cdot 10^{-4}} = 2 \cdot 10^5 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^3}.$$

Так само, переводячи значення в інші одиниці вимірювання, величина приймає вигляд $\rho_E = 2 \cdot 10^5 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^3} = 0,2 \frac{\text{Вт}}{\text{см}^3}$.

Щоб перевірити ефективність ультразвукового очищення води, тобто визначити її чистоту до і після обробки, доцільно застосувати доступні методи контролю основних біологічних і хімічних показників якості води.

1. Біологічні показники: визначення мікробного забруднення

Методом мембранної фільтрації або чашки Петрі (бактеріологічний аналіз) можна виміряти кількість колонієутворюючих одиниць (КУО/мл) бактерій (зокрема, кишкова паличка – *E. coli*).

Також можна скористатись експрес-тестами (Colitag, Hydrosense, або Aquagenx СВТ) на вміст бактерій, які показують зміну кольору чи флуоресценції в присутності живих бактерій.

2. Хімічні показники: виявлення забруднювачів і змін складу

Вимірювання мутності (каламутності) можна здійснити з допомогою спеціалізованих приладів, як турбідиметра та фотометра.

Також можна оцінити електропровідність рідини електронним тестером, враховуючи що після завершення кавітації іони можуть осісти на дні води.

Самим простим способом вважається візуальний, коли дослідник на око може визначити чи зменшилась каламутність рідини. Інакший варіант – покращення запаху за рахунок знищення органіки у воді.

3.3 Метрологічне забезпечення

Основні теоретичні положення про невизначеність вимірювань

Невизначеність вимірювання відображає той факт, що для будь-якої фізичної величини не існує єдиного, абсолютно точного значення. Замість цього маємо множину можливих значень, які утворюють розподіл навколо певного результату, що є найбільш узгодженим із наявними експериментальними даними, методикою вимірювання та сучасними уявленнями про фізичну природу явища. Таким чином, невизначеність свідчить про обмежене знання реального значення вимірюваної величини [22].

Після внесення поправок на виявлені систематичні похибки, результат все одно залишається наближенням до істинного значення, оскільки завжди залишаються залишкові невизначеності, зумовлені випадковими коливаннями та неточністю врахування відомих факторів. На практиці існує багато ***джерел похибок***, які призводять до невизначеності в результатах вимірювань [22]:

- Неповне або нечітке формулювання самої вимірюваної величини;
- Неточне втілення визначення величини на практиці;
- Вибірка, що не є репрезентативною – отриманий результат не відображає реальне значення;
- Недостатньо точні знання або вимірювання впливу зовнішніх факторів (температури, вологості, тиску тощо);
- Суб'єктивні похибки, зокрема при зчитуванні значень з аналогових приладів;
- Обмежена роздільна здатність або чутливість приладу;
- Неточності у характеристиках еталонів, стандартних зразків речовин або матеріалів;
- Похибки в значеннях фізичних констант або інших параметрів, які залучаються з зовнішніх джерел при обробці результатів;
- Наближення та припущення, що застосовуються в обчисленнях або процедурі вимірювання;

- Розбіжності між повторними вимірами за, на перший погляд, ідентичних умов.

Запровадження поняття «невизначеність вимірювання» є необхідним кроком для забезпечення уніфікованого підходу до оцінки достовірності результатів. Така оцінка базується не на знанні істинного значення вимірюваної величини, яке зазвичай недоступне, а на аналізі статистичних характеристик результатів, умов проведення вимірювання та параметрів вимірювального обладнання.

Усі види невизначеності результатів вимірювання класифікують за методом їх оцінювання на дві основні категорії: *тип А* і *тип В*. Такий поділ служить не для того, щоб підкреслити фундаментальну відмінність між цими типами похибок, а скоріше для зручності при їх обговоренні та подальшій обробці. Обидва типи ґрунтуються на ймовірнісному підході і оцінюються за допомогою таких статистичних характеристик, як *дисперсія* або *середньоквадратичне (стандартне) відхилення* [22].

- *Невизначеність типу А* оцінюється за допомогою статистичних методів, що застосовуються до серії повторюваних вимірювань. Це класичний підхід, який дозволяє розрахувати показники похибки на основі отриманого експериментального розподілу.

- *Невизначеність типу В* охоплює ті ситуації, де повторні вимірювання неможливі, або статистичний аналіз непридатний. У таких випадках використовують інформацію з технічної документації, сертифікатів калібрування, попередніх досліджень або експертні оцінки.

Залежно від форми представлення, невизначеність вимірювання поділяється на кілька різновидів [22]:

- *Стандартна невизначеність* – кількісна оцінка у вигляді стандартного відхилення, що відповідає поширенню значень в межах одного експерименту або джерела похибки.

• **Комбінована невизначеність** – результат статистичного поєднання декількох стандартних невизначеностей, що стосуються різних джерел похибок одного вимірювання.

• **Розширена невизначеність** – інтервал, що задає діапазон значень навколо вимірюного результату, в якому з визначеною довірою (наприклад, 95% та 99%) ймовірно міститься істинне значення фізичної величини.

Також виділяють відносні форми цих величин, які нормуються до результату вимірювання [22]:

• **Відносна стандартна невизначеність** – це відношення стандартної невизначеності до числової оцінки величини.

• **Відносна комбінована невизначеність** – частка комбінованої невизначеності відносно результату вимірювання.

• **Відносна розширена невизначеність** – аналогічне співвідношення для розширеної невизначеності.

У випадках, коли значення вхідної величини x_i не може бути встановлено на основі повторюваних експериментальних спостережень, відповідну **оцінку дисперсії** $u^2(x_i)$ або **стандартну невизначеність** $u(x_i)$ визначають за допомогою експертного оцінювання, що спирається на всю наявну інформацію про можливі коливання величини X_i . Така оцінка базується на раціональних припущеннях, обґрунтованих практичним досвідом, знанням фізичних властивостей об'єкта та документально підтверджених даних. Це і концепт застосування оцінки невизначеності результатів вимірювань **типу В** [23].

До джерел, які можуть бути використані при формуванні обґрунтованої оцінки, належать:

- архівні або опубліковані результати попередніх вимірювань;
- практичні знання, накопичені з досвіду експлуатації обладнання або роботи з аналогічними матеріалами;
- технічна документація та специфікації, надані виробником;

- дані, зазначені у сертифікатах калібрування чи метрологічних атестатах;
- опубліковані довідкові значення разом із зазначеними для них невизначеностями.

У ряді випадків можливо лише вказати межі допустимого діапазону значення величини X_i , тобто стверджується, що значення X_i знаходиться в інтервалі від a_- до a_+ з високою достовірністю, що наближається до одиниці для практичних задач. Водночас ймовірність того, що ця величина виходить за межі заданого інтервалу, вважається практично нульовою [23].

У разі відсутності додаткової інформації щодо ймовірного розподілу значень усередині цього інтервалу, приймається припущення про **рівномірний (прямокутний) розподіл**, за якого кожне значення в межах від a_- до a_+ вважається однаково ймовірним.

У такому випадку **очікуване (середнє) значення** x_i прирівнюється до центру інтервалу $x_i = \frac{a_- + a_+}{2}$, а відповідна **дисперсія стандартної невизначеності** визначається як [23]:

$$u^2(x_i) = \frac{(a_+ + a_-)^2}{12}. \quad (3.6)$$

Якщо позначити половину ширини інтервалу як a , тобто $a = \frac{a_+ + a_-}{2}$, то формула для **дисперсії** набуде вигляду:

$$u^2(x_i) = \frac{a^2}{3}. \quad (3.7)$$

У такому випадку **стандартну невизначеність** $u(x_i)$, яка характеризує середньоквадратичне відхилення від середнього значення, визначають за формулою:

$$u(x_i) = \frac{a}{\sqrt{3}}. \quad (3.8)$$

Комбінована стандартна невизначеність $u_c(y)$ – це величина, що визначається як **додатне квадратне коріння з комбінованої дисперсії** $u_c^2(y)$, яка відображає сумарний вплив усіх джерел невизначеності вхідних параметрів на результат функції $y = f(x_1, x_2, \dots, x_N)$ [23].

Комбінована дисперсія розраховується за формулою:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i), \quad (3.9)$$

де $\frac{\partial f}{\partial x_i}$ – частинна похідна вихідної функції f по вхідній величині x_i ;

$u(x_i)$ – стандартна невизначеність кожної вхідної змінної;

$u_c^2(y)$ – сумарна дисперсія вихідного результату.

Таким чином, **комбіновану (сумарну) дисперсію** можна інтерпретувати як суму внесків від кожної вхідної величини, зважених на квадрат їхнього впливу (градієнта). Це дозволяє кількісно оцінити, який вплив має кожне джерело невизначеності на кінцевий результат [23].

Звідси можна вивести наступну формулу:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N c_i^2 u^2(x_i), \quad (3.10)$$

де $c_i = \frac{\partial f}{\partial x_i}$ – коефіцієнт впливу (чутливості) для змінної x_i .

Для зручності в результаті прийнято представляти сумарну невизначеність в загальному вигляді, тому формула приймає вигляд:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N u^2(x_i)}. \quad (3.11)$$

Розрахункова частина для знаходження сумарної невизначеності

Метрологічний аналіз є невід’ємним етапом при оцінюванні точності та надійності роботи будь-якої лабораторної установки, так як всі вони без виключення потребують певного рівня точності.

Метою розрахункової частини є визначення сумарної невизначеності результату, що дозволяє обґрунтовано оцінити достовірність отриманих вимірювальних даних, їх відтворюваність та придатність для технічного і технологічного контролю процесу.

Розрахунок для генератора сигналів:

1. Абсолютна похибка (частота):

$$\pm 5 \cdot 10^{-6} \text{ Гц}$$

Стандартна невизначеність:

$$u_f = \frac{5 \cdot 10^{-6} \text{ Гц}}{\sqrt{3}} = 2,86675 \cdot 10^{-6} \text{ Гц}$$

Стандартна невизначеність в %:

$$u_f = \frac{2,86675 \cdot 10^{-6} \text{ Гц}}{40000 \text{ Гц}} \cdot 100 \% = 7,2168 \cdot 10^{-9} \%$$

2. Абсолютна похибка (напруга):

$$\pm 0,5 \text{ дБ}$$

Перетворення коефіцієнту підсилення (в дБ) у можливе відхилення:

$$D_U = 20 \cdot \log_{10} \frac{U_2}{U_1} \rightarrow \frac{U_2}{U_1} = 10^{\frac{0,5}{20}} = 1,05925 \text{ рази (зміна)}$$

Похибка ФВ в %:

$$\frac{U_2}{U_1} \% = 10^{\frac{D_U+40}{20}} = 10^{\frac{1,05925+40}{20}} = 5,9254 \%$$

Абсолютна похибка:

$$\frac{5,9254 \%}{100 \%} \cdot 0,158 \text{ В} = \pm 0,009362 \text{ В}$$

Стандартна невизначеність:

$$u_U = \frac{0,009362 \text{ В}}{\sqrt{3}} = 0,005405 \text{ В}$$

Стандартна невизначеність в %:

$$u_U = \frac{0,005405 \text{ В}}{1 \text{ В}} \cdot 100 \% = 0,5405 \%$$

Розрахунок потужності:

$$P = \frac{U^2}{R} = \frac{0,158^2 \text{ В}}{50 \text{ Ом}} = 0,00049928 \text{ Вт}$$

3. Абсолютна похибка (потужність):

$$\pm 0,5 \text{ дБ}$$

Перетворення коефіцієнту підсилення (в дБ) у можливе відхилення:

$$D_P = 10 \cdot \log_{10} \frac{P_2}{P_1} \rightarrow \frac{P_2}{P_1} = 10^{\frac{0,5}{10}} = 1,12202 \text{ рази (зміна)}$$

Похибка ФВ в %:

$$\frac{P_2}{P_1} \% = 10^{\frac{D_P+20}{10}} = 10^{\frac{1,12202+20}{10}} = 12,202 \%$$

Абсолютна похибка:

$$\frac{12,202 \%}{100 \%} \cdot 0,00049928 \text{ Вт} = \pm 6,092215 \cdot 10^{-5} \text{ Вт}$$

Стандартна невизначеність:

$$u_P = \frac{6,092215 \cdot 10^{-5} \text{ Вт}}{\sqrt{3}} = 3,51734 \cdot 10^{-5} \text{ Вт}$$

Стандартна невизначеність в %:

$$u_P = \frac{3,51734 \cdot 10^{-5} \text{ Вт}}{1 \text{ Вт}} \cdot 100 \% = 3,51734 \cdot 10^{-3} \%$$

Розрахунок для підсилювача:

Похибка в % згідно з паспортом приладу:

$$3 \%$$

1. Похибка потужності

Абсолютна похибка:

$$\frac{3 \%}{100 \%} \cdot 50 \text{ Вт} = \pm 1,5 \text{ Вт}$$

Стандартна невизначеність:

$$u_P = \frac{1,5 \text{ Вт}}{\sqrt{3}} = 0,866025 \text{ Вт}$$

Стандартна невизначеність в %:

$$u_P = \frac{0,866025 \text{ Вт}}{100 \text{ Вт}} \cdot 100 \% = 0,866025 \%$$

2. Похибка напруги

Абсолютна похибка:

$$\frac{3 \%}{100 \%} \cdot 50 \text{ В} = \pm 1,5 \text{ В}$$

Стандартна невизначеність:

$$u_U = \frac{1,5 \text{ ВТ}}{\sqrt{3}} = 0,866025 \text{ В}$$

Стандартна невизначеність в %:

$$u_U = \frac{0,866025 \text{ В}}{100 \text{ В}} \cdot 100 \% = 0,866025 \%$$

Розрахунок для п'єзоперетворювача:

Абсолютна похибка:

$$\pm 500 \text{ Гц}$$

Стандартна невизначеність:

$$u_f = \frac{500 \text{ Гц}}{\sqrt{3}} = 286,67513 \text{ Гц}$$

Стандартна невизначеність в %:

$$u_f = \frac{286,67513 \text{ Гц}}{40000 \text{ Гц}} \cdot 100 \% = 0,72168 \%$$

Розрахунок для термостата:

Абсолютна похибка:

$$\pm 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$$

Стандартна невизначеність:

$$u_t = \frac{0,1 \text{ }^\circ\text{C}}{\sqrt{3}} = 0,057735 \text{ }^\circ\text{C}$$

Стандартна невизначеність в %:

$$u_t = \frac{0,057735 \text{ } ^\circ\text{C}}{40 \text{ } ^\circ\text{C}} \cdot 100 \% = 0,144338 \%$$

Розрахунок для осцилографа:

Абсолютна похибка:

$$\pm 1 \cdot 10^{-9} \text{ с}$$

Стандартна невизначеність:

$$u_T = \frac{1 \cdot 10^{-9} \text{ с}}{\sqrt{3}} = 5,7735 \cdot 10^{-10} \text{ с}$$

Стандартна невизначеність в %:

$$u_T = \frac{5,7735 \cdot 10^{-10} \text{ с}}{1 \text{ с}} \cdot 100 \% = 5,7735 \cdot 10^{-8} \%$$

Розрахунок для частотоміра:

Абсолютна похибка:

$$\pm 1 \cdot 10^{-8} \text{ Гц}$$

Стандартна невизначеність:

$$u_f = \frac{1 \cdot 10^{-8} \text{ Гц}}{\sqrt{3}} = 5,7735 \cdot 10^{-9} \text{ Гц}$$

Стандартна невизначеність в %:

$$u_f = \frac{5,7735 \cdot 10^{-9} \text{ Гц}}{40000 \text{ Гц}} \cdot 100 \% = 1,44338 \cdot 10^{-11} \%$$

Розрахунок для вольтметра:

Абсолютна похибка в % (за формулою взятої з паспорту приладу):

$$\begin{aligned} [0,15 + 0,05 \cdot (U_{kx}/U_x - 1)] \% &= [0,15 + 0,05 \cdot (10 \text{ В}/0,158 \text{ В} - 1)]\% \\ &= 3,264557 \% \end{aligned}$$

Абсолютна похибка:

$$\frac{3,264557 \%}{100 \%} \cdot 0,158 \text{ В} = \pm 0,05158 \text{ В}$$

Стандартна невизначеність:

$$u_U = \frac{0,05158 \text{ В}}{\sqrt{3}} = 0,02978 \text{ В}$$

Стандартна невизначеність в %:

$$u_U = \frac{0,02978 \text{ В}}{10 \text{ В}} \cdot 100 \% = 0,2978 \%$$

Розрахунок сумарної невизначеності:

$$u_c = \sqrt{0,72168^2 + 0,144338^2 + (5,7735 \cdot 10^{-8})^2 + 0,2978^2 + (7,2168 \cdot 10^{-9})^2 + (3,51734 \cdot 10^{-3})^2 + 0,5405^2 + 0,866025^2 + 0,866025^2 + (1,44338 \cdot 10^{-11})^2}$$

$$u_c = 1,55644 \%$$

Висновки

В цьому розділі було проаналізовано ключове фізичне явище, на якому базується ефективність ультразвукового очищення – кавітацію. Висвітлено два основні її типи: гідродинамічну, що виникає при протіканні рідини з локальними перепадами тиску, та акустичну – спричинену інтенсивними ультразвуковими хвилями. Детально описано механізм утворення, росту та колапсу бульбашок, а також локальні наслідки цього процесу – ударні хвилі, високі температури, мікроструми, що й забезпечують руйнування клітин мікроорганізмів та диспергування частинок.

Розглянуто прикладні аспекти використання кавітації в системах знезараження води. На основі огляду літератури та технічних рішень обґрунтовано вибір частоти 40 кГц для лабораторної установки як компроміс між ефективністю кавітації та безпечністю впливу.

Розроблено математичну модель процесу очищення води в лабораторній установці, яка враховує геометричні, електричні та хвильові параметри системи. Модель дає змогу прогнозувати інтенсивність хвиль, щільність потужності в зоні обробки, а також оптимізувати тривалість і режим роботи.

Проведено метрологічний аналіз параметрів системи: визначено основні джерела похибок, зокрема нестабільність потужності, похибки вимірювальних приладів, втрати на переходах. Розраховано сумарну невизначеність експериментальних даних, що дозволяє об'єктивно оцінити ефективність обробки. Результати підтвердили доцільність застосування розробленої системи для локального очищення води в умовах малої витрати при високому ступені знезараження.

4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА АНАЛІЗ НЕБЕЗПЕК ПІД ЧАС РОБОТИ

4.1 Значення охорони праці у забезпеченні безпечних та здорових умов праці.

Охорона праці – комплекс взаємопов'язаних правових, соціально-економічних, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних і лікувально-профілактичних заходів, які спрямовані на захист здоров'я людини та підтримання її максимально ефективної працездатності в умовах трудової діяльності. Працездатність при цьому визначається як здатність особи упродовж певного часу виконувати визначений обсяг роботи з необхідною ефективністю. Під трудовим процесом розуміють сукупність цілеспрямованих дій працівника або групи працівників, пов'язаних із виконанням виробничих завдань, виготовленням продукції чи наданням послуг. [24]

Характеристика об'єкта проєктування:

Об'єктом проєктування є лабораторна або малогабаритна установка для очищення та знезараження води з використанням ультразвуку частотою 40 кГц. До складу установки входять генератор сигналу (**Rohde&Schwarz SML01**), підсилювач потужності (E&I 2100L), ультразвуковий п'єзоперетворювач потужністю 50 Вт, резервуар з нержавіючої сталі, циркулятор, температурне реле та вимірювальне обладнання (вольтметр, осцилограф тощо). Установка призначена для експериментальних досліджень або підготовки води для технічних та господарських потреб.

Аналіз виробничого травматизму і професійних захворювань:

В галузі технологій очищення води, особливо з використанням фізичних методів, (в цьому випадку – ультразвук), дотримання вимог охорони праці має надзвичайно важливе значення, зважаючи на наявність електричних, теплових та акустичних впливів.

На підприємствах водоочисної галузі та в лабораторіях, які працюють з високочастотним обладнанням, трапляються випадки професійних захворювань, пов'язаних із впливом шуму, вібрацій, електромагнітного

випромінювання, високої напруги та температур. Статистика показує, що в основному нещасні випадки відбуваються через порушення правил експлуатації електроустановок, необережне поводження з нагрівальними елементами, несправність захисного заземлення, невідповідність робочого обладнання необхідним стандартам якості, а також відсутність персоналу, підготовленого до роботи з високочастотними сигналами.

Необхідність і мета аналізу шкідливих і небезпечних факторів:

Наявність ультразвукових джерел високої потужності створює локальні зони акустичного тиску, здатного впливати на органи слуху, тканини людини та резонансні структури техніки. Крім того, внаслідок неполадок можуть виникати небезпечні електричні ситуації – коротке замикання, перегрів, пробій ізоляції. Тому важливо проводити всебічний аналіз цих факторів перед початком роботи, оцінити їх рівень і потенційний ризик, і детально ознайомити працівників з цими положеннями.

Мета розділу охорони праці:

- Мінімізація виробничих ризиків;
- Запобігання ушкодженню здоров'я персоналу;
- Забезпечення безпечної експлуатації установки;
- Охорона довкілля від негативного впливу технічних факторів.

Забезпечення високого рівня охорони праці на етапах проектування, монтажу, налагодження та експлуатації ультразвукових водоочисних установок є критично важливим для збереження здоров'я персоналу та довкілля. Цей розділ спрямований на попередження аварій, мінімізацію впливу шкідливих факторів та підвищення загального рівня безпеки.

4.2 Аналіз умов праці і виявлення потенційно-небезпечних та шкідливих факторів виробничого середовища.

Загальна характеристика робочого середовища:

У процесі експлуатації ультразвукової установки для знезараження води можуть виникати фізичні, електричні, хімічні та ергономічні фактори, що мають потенційний негативний вплив на здоров'я обслуговуючого персоналу. Для виявлення та нейтралізації таких факторів проведено їх аналіз із подальшою розробкою заходів щодо безпеки праці. До даних ризиків належать:

- **електромагнітні поля** (від генераторів та підсилювачів);
- **ультразвукові коливання** (безпосередній або побічний вплив від електроакустичного випромінювача);
- **електричний струм високої напруги** (в підключених приладах);
- **теплові випромінювання** (від компонентів установки, що нагріваються за високої потужності);
- **шум** (довготривале перебування в присутності гучно працюючих приладів може викликати негативні наслідки);
- **напруження зору та психоемоційне навантаження** (під час роботи з комп'ютером);
- **монотонність** (виконання вимірювань, програмування приладів та аналіз результатів можуть негативно вплинути на емоційний стан дослідника).

Таблиця 2.1 – Аналіз потенційно-небезпечних та шкідливих виробничих факторів

Джерело небезпеки	Характеристика потенційно-небезпечних виробничих факторів та їх допустимі значення
<p>Ультразвуковий перетворювач (акустичне випромінювання у воді та повітрі)</p>	<p>При роботі ультразвукового перетворювача на частоті 40 кГц у воді створюється високочастотне акустичне поле, яке може передаватися в повітряне середовище. Надмірна інтенсивність ультразвуку в повітрі може призводити до порушень слуху, головного болю, втоми, порушень вестибулярного апарату. Допустимий рівень ультразвукового тиску в повітрі на робочому місці – не більше 110 дБ для несуб'єктивного ультразвуку та 80 дБ для сумарного звукового навантаження. [25]</p>
<p>Електромагнітні поля високої частоти, створювані при роботі підсилювача високої частоти</p>	<p>Під час роботи підсилювача в діапазоні 40 кГц формується електромагнітне поле. Тривалий вплив ЕМП може викликати функціональні зміни в нервовій та серцево-судинній системі. Для частот 0,03–300 МГц допустима потужність потоку енергії становить не більше 25 мкВт/см². [26]</p>
<p>Ризик ураження струмом при недостатньому заземленні, пошкодженні ізоляції або витоку води</p>	<p>При порушенні ізоляції, відсутності заземлення або потраплянні води на контакти виникає ризик ураження електричним струмом. Безпечними вважаються значення: напруга дотику ≤ 1 В, струм дотику $\leq 0,5$ мА. [27]</p>
<p>Контакт із гарячими поверхнями генератора, підсилювача, ванни</p>	<p>Електронні компоненти установки в процесі роботи можуть нагріватися до температур, небезпечних для дотику. При температурі понад 45 °С можливі опіки. Для поверхонь, з якими може мати контакт оператор, гранично допустима температура – 43 °С [28]</p>

Продовження таблиці 2.1

<p>П'єзоперетворювач та корпус (локальна вібрація)</p>	<p>Під час роботи установки можуть передаватися низькочастотні коливання на корпус, особливо при поганому кріпленні. Вібрація спричиняє м'язову втому, порушення кровообігу, суглобові захворювання. Допустимий рівень локальної вібрації – віброшвидкість не більше 0,3 м/с² або 92 дБ [29]</p>
<p>Робоче місце оператора (освітлення та втома зору)</p>	<p>Недостатнє освітлення призводить до перевтоми очей, головного болю, зниження точності вимірювання. Мінімальний рівень освітленості для точної лабораторної роботи – не менше 300 лк</p>
<p>Тривале сидіння, ефект втоми та зниження уважності</p>	<p>При тривалій роботі в сидячому положенні без перерв виникає м'язове напруження, втома, порушення кровообігу. Рекомендовано робити перерви по 15 хв після кожних 120 хв роботи</p>
<p>Волога і краплі води поблизу електрообладнання (ризик КЗ)</p>	<p>Водяний конденсат або витік з ванни при неправильному встановленні може спричинити коротке замикання, перегрівання, пожежу. Усі електронні модулі повинні мати ступінь захисту IP44 або вищий [30]</p>

Для забезпечення безпеки необхідно виконати такі заходи:

1. Контролювати рівні ультразвуку (≤ 75 дБ).
2. Екранувати ЕМП та забезпечити правильне заземлення.
3. Обов'язковий захист від перегріву (≤ 43 °С поверхні).
4. Віброзахист конструкцій.
5. Організація достатнього освітлення (≥ 300 лк).
6. Виконання вимог щодо IP-захисту та ПЗВ (пристрої захисного вимкнення).

Всі вимірювання слід виконувати акредитованими приладами відповідно до вимог ДСН і ДСанПіН.

4.3 Забезпечення нормальних умов праці.

Приміщення лабораторії

В таблиці нижче представлені основні фізичні характеристики лабораторного приміщення, зокрема площа, об'єм, площу та об'єм на одного працівника, а також опис конструктивних елементів (стіни, підлога, стеля, вікна, двері) та наявного обладнання. Вона дозволяє оцінити відповідність умов праці мінімальним санітарно-будівельним та ергономічним вимогам.

Таблиця 3.1 – Технічні характеристики лабораторного приміщення для ультразвукового очищення води

Характеристика	Значення
Загальна площа приміщення	25 м ²
Загальний об'єм приміщення	75 м ³ (25 м ² × 3 м висоти)
Площа на одного працівника	≥ 6 м ²
Об'єм на одного працівника	≥ 20 м ²
Освітлення	500 лк загальне, 750 лк комбіноване
Тип освітлення	LED-світильники IP54 (загальні та локальні)
Опалення	Водяне або електричне радіаторне
Підлога	Непровідна, антиковзна, без щілин
Стіни та стеля	Легкомиючі, світлі, звуко- та теплоізолюючі
Вікна	Зі світлопропусканням > 20% площі стін
Двері	0,9–1,0 м шириною, з відкриванням назовні
Основний лабораторний стіл	Електроізольований, площа ≥ 1,5 м ²
Стілець лабораторний	З регулюванням висоти, з електроізоляційним покриттям
Електропостачання	Заземлення, автоматичний захист, аварійне відключення
Вентиляція	Механічна припливно-витяжна, шумопоглинаюча
Повітропровід	Виведений над ванною, зворотний клапан, витяжка
Додаткове обладнання	Стелажі з нержавіючої сталі, ємності, контейнери

Метеорологічні умови

Забезпечення нормативного мікроклімату (температура, вологість, швидкість повітря) є ключовим для підтримання фізіологічного комфорту працівників, стабільної роботи приладів і зниження впливу несприятливих факторів на здоров'я.

Таблиця 3.2 – Мікроклімат

Назва приміщення	Категорія	Період року	t, °C (факт/ /оптимум/ /допуск)	RH, % (факт/ /оптимум/ /допуск)	v, м/с (факт/ /оптимум/ /допуск)
УЗ-лабораторія	Легка	Теплий	22–24 / 22–24 / 20–26	40–60 / 40–60 / 30–70	≤0,2 / ≤0,2 / ≤0,35
		Холодний	20–22 / 20–22 / 18–24	40–60 / 40–60 / 30–70	≤0,2 / ≤0,2 / ≤0,35

Освітленість

Правильно організоване освітлення – критичний фактор для точних робіт, що потребують візуального контролю. Враховується тип зорової діяльності, джерела світла та аварійне освітлення, необхідне у разі знеструмлення.

Таблиця 3.3 – Штучна освітленість робочих місць працівників [31] [32]

Назва приміщення або вид діяльності	Розряд зорової роботи	Освітленість, лк	Тип освітлення
УЗ-лабораторія (монтаж та налаштування системи)	Ша	500	Загальне: люмінесцентні світильники з УПП (антивідблискові); Комбіноване: місцеве LED-освітлення
Робоче місце з осцилографом/приладом	II	500-750	Комбіноване: світильники з направленим розсіяним світлом та LED-підсвіткою
Сервісна зона (ремонт електроніки, з'єднань)	Ів	750	Комбіноване: високоточне LED-освітлення зі світильниками із

			захистом від блиску
--	--	--	---------------------

Продовження таблиці 3.3

Загальний прохід у приміщенні	V	100	Загальне: економні світильники з широким кутом розсіювання світла
Аварійне освітлення	—	≥ 1	Аварійне: акумуляторні або живлені від незалежного джерела лінійні/точкові світильники з LED-модулями
Евакуаційне освітлення	—	≥ 1	Евакуаційне: маркерні або лінійні LED-світильники з автономним живленням, розташовані вздовж маршрутів

Засоби індивідуального захисту

Підбір ЗІЗ залежить від конкретних професійних ризиків: шуму, УЗ-випромінювання, електромагнітних полів, вологи та температури. Їх використання знижує ризик професійних захворювань і забезпечує відповідність санітарно-гігієнічним нормам.

Таблиця 3.4 – ЗІЗ [27] [28]

Професія, шкідливий виробничий фактор	Призначення засобу ЗІЗ	Назва засобу ЗІЗ (марка, характеристика)	Необхідна кількість
Оператор установки. Електричний струм (до 220 В)	Захист від ураження електричним струмом	Діелектричні рукавички, килимок діелектричний	1 пара, 1 килимок
Оператор установки. Ультразвук (контактний, повітряний)	Захист слуху при можливому витокі височастотного шуму	Протишумні вкладиші (Беруші з характеристикою шумопоглинання >25 дБ)	1 комплект

Продовження таблиці 3.4

Оператор установки. Бризки води, контакт з дезінфекційною рідиною	Захист шкіри та одягу від вологи і розчинів	Захисний водонепроникний фартух, рукавички з нітрилу	1 комплект
Оператор. Яскраве світло при тестуванні/налаштуванні	Захист очей при роботі з осцилографом та лазерною індикацією	Окуляри захисні з прозорими лінзами, антиблікове покриття	1 пара
Оператор. Контакт із нагрітими поверхнями УЗ ванни	Захист від термічного ураження	Термостійкі рукавички (до 100 °С)	1 пара

Заходи щодо усунення впливу шкідливих факторів

Для забезпечення максимально безпечних умов праці застосовуються інженерні та організаційні рішення, які мінімізують вплив шкідливих фізичних факторів на працівника. Серед них – вентиляція, екрани, автоматичний контроль, ізоляція джерел шуму та вібрацій.

Таблиця 3.5 – Шкідливі та потенційно небезпечні фактори, та способи захисту проти їхнього впливу [25] [26] [28] [33]

Фактор	Засіб захисту
Електричний струм (до 220 В)	Встановлення заземлення, використання ПЗВ, діелектричних рукавичок, перевірка цілісності кабелів
Високочастотний шум/ультразвук (повітряний)	Герметизація джерел ультразвуку, звукопоглинаючі матеріали, беруші, контроль потужності генератора
Вібрація (через корпус або стіл)	Установка ПЕП на амортизуючу основу, використання прокладок між установкою і поверхнею
Теплове випромінювання	Забезпечення стабільної вентиляції, інфрачервоні обігрівачі в холодний період, кондиціонування влітку
Електромагнітне поле (від генератора, підсилювача)	Встановлення екранування, дотримання мінімальної відстані (1 м), обмеження тривалості перебування

Бризки дезінфекційної рідини або гарячої води	Використання захисного фартуха, окулярів, нітрилових рукавичок, прозорих щитків
---	---

4.4 Забезпечення безпеки технологічних процесів, монтажу, пусконаладжувальних, ремонтних робіт та експлуатації обладнання, приладів та пристроїв.

Захист працівників від потенційних небезпек виробничого середовища досягається завдяки впровадженню технічних і організаційних рішень, які знижують дію шкідливих факторів. Застосовані методи: заземлення, екранізація, автоматизований контроль параметрів, аварійні блокування тощо. Комплексний підхід дає змогу забезпечити стабільну експлуатацію обладнання, а також захистити персонал від травмування чи професійних захворювань.

Таблиця 4.1 – Технічні заходи, методи та засоби захисту від потенційних небезпек виробничих факторів [25] [27] [28] [30]

Небезпечний виробничий фактор	Методи та засоби захисту	Технічна характеристика засобу захисту	Місце розміщення / Час використання
Ультразвукові коливання > 20 кГц	Звукоізоляція, обмеження прямого впливу, дистанційне керування	Звукопоглинаючі кожухи ізоляції на ванні (≥ 30 дБ), дистанційний пульт керування	На корпусі УЗ-ванни; використовується постійно
Електричний струм > 50 В	Заземлення, ПЗВ, діелектричне взуття і килимки	Заземлення системи < 4 Ом, ПЗВ на 30 мА, діелектричний килимок	На щитку живлення, перед робочим місцем
Шум ≥ 85 дБ	Захисні навушники, шумозаглушення приміщення	Навушники SNR ≥ 25 дБ; панелі з поглинанням NRC ≥ 0.75	На голові працівника; стіни приміщення
Температура води до 40 °С	Ізоляція ванни, термореле	Термореле Inkbird ІТС-308, тепловий кожух	На ванні, щиті керування
Можливість витоку струму або УЗ-хвиль	Заземлення ванни, розривні екрани	Мідне заземлення на корпусі ванни; металевий екран	На корпусі ванни, з'єднання з електрощитом

Слизька підлога від конденсату/води	Протиковзке покриття, трапи	ПВХ-покриття з антиковзним шаром R11	По всьому периметру лабораторії
---	--------------------------------	--	---------------------------------------

Обов'язки працівника перед початком роботи

Працівник перед початком роботи з УЗ-обладнанням зобов'язаний:

1. Провести зовнішній огляд установки, переконатися у відсутності пошкоджень проводки, корпусу, ПЕП.
2. Перевірити наявність заземлення за допомогою індикатора.
3. Увімкнути систему вентиляції/витяжки.
4. Забезпечити себе ЗІЗ: діелектричні рукавички, навушники, захисні окуляри.
5. Перевірити показники напруги, струму, температури на пульті управління.

Електробезпека установки

Для забезпечення електробезпеки під час роботи з УЗ-установкою реалізовані наступні заходи:

- Всі електронні прилади (генератор, підсилювач, частотомір, осцилограф) мають підключатися до мережі лише через справні розетки з трипровідним з'єднанням і захисним заземленням.
- Розподільча електромережа має бути обладнана автоматичними вимикачами з захистом від перевантаження та короткого замикання.
- Повинні використовуватись кабелі з негорючою ізоляцією, які прокладаються відкрито із захистом від фізичних пошкоджень.
- Обов'язкова регулярна перевірка опору ізоляції та відповідності заземлення нормативам.

Вимоги безпеки під час проведення ремонту

Під час обслуговування чи ремонту установки УЗ-очищення необхідно дотримуватись:

- Повного знеструмлення всієї системи – відключення автоматів живлення та контроль відсутності напруги.
- Вивішування таблички «Не вмикати! Працюють люди» на розподільчому щитку.

- Використання ізольованого інструменту.
- Проведення ремонту тільки за присутності відповідальної особи або під технічним наглядом.
- Після завершення ремонту – перевірка всіх з'єднань, повторне заземлення, пробний пуск без навантаження.

Вимоги до обслуговування та експлуатації контрольно-вимірювальних приладів

До роботи з лабораторною установкою допускаються лише особи, що мають допуск до роботи з електричними установками до 1000 В, ознайомлені з планом перетікання експерименту та можливими відхиленнями від параметрів, та успішно пройшли інструктаж з охорони праці щодо факторів небезпеки та їх запобігання і вирішення.

У межах безпечної експлуатації обладнання важливе значення має прогнозування потенційних аварій та оперативна готовність до них. Аналіз можливих сценаріїв – таких як перегрів приладів, витік води, коротке замикання чи вихід з ладу ультразвукової системи – дозволяє сформулювати чіткий перелік дій для локалізації наслідків.

Таблиця 4.2 – Аварійні ситуації та заходи реагування

Тип ситуації	Дії персоналу
Перегрів води або ПЕП (>45 °C)	Негайно вимкнути установку, активувати охолодження
Витік рідини на електричні елементи	Вимкнути мережу, усунути витік, просушити обладнання
Відсутність генерації УЗ сигналу	Перевірити підключення, напругу, кабелі, ПЕП
Надмірне ЕМП або шум (акустичний фон > 90 дБ)	Вимкнути установку, провести діагностику екранування
Коротке замикання	Вимкнути мережу, перевірити автоматичний вимикач

Усі роботи при аваріях виконуються у знеструмленому стані, з використанням засобів індивідуального захисту (гумові рукавиці, окуляри, діелектричні килимки).

5 Пожежна безпека та безпека у надзвичайних ситуаціях.

Класифікація приміщення за пожежною небезпекою

Згідно з [34], приміщення, у якому встановлено ультразвукову установку для знезараження води, належить до категорії В (пожежонебезпечне) – через наявність електрообладнання з високою щільністю розміщення та можливої присутності горючих речовин у незначних кількостях.

Аналіз можливих джерел загоряння

Ідентифікація потенційних джерел займання в лабораторному середовищі – особливо у присутності електричних установок, кабелів і пристроїв з активним охолодженням – є основою пожежної безпеки. Превентивні заходи включають використання автоматичних вимикачів, дотримання стандартів з електробезпеки та забезпечення приміщення засобами пожежогасіння згідно з нормами.

Таблиця 5.1 – Джерела загоряння та способи запобігання

Джерело загоряння	Причина виникнення	Ймовірність	Засоби запобігання
Коротке замикання в кабелях живлення	Пошкодження ізоляції, перегрів	Середня	Використання кабелів з негорючою ізоляцією, УЗО
Іскріння в зоні підключення ПЕП	Ненадійні або погано затиснуті контакти	Низька	Регулярна перевірка з'єднань, металеве екранування
Перегрів підсилювача потужності	Порушення вентиляції, надмірне навантаження	Середня	Наявність охолодження, контроль температури корпусу
Попадання води на електронні вузли	Пошкодження герметизації ванни	Середня	Використання герметичних ущільнень,

			діелектричних основ
Електрична дуга в несправному генераторі чи підсилювачі	Внутрішня несправність або перевантаження	Низька	Обмеження напруги, захист від перенапруги, техогляд

Вимоги до будівель та приміщень

Раціональна організація простору лабораторії базується на дотриманні чинних нормативів щодо площі, об'єму, освітлення, вентиляції та конструктивних рішень. Правильно підібрані параметри забезпечують не лише функціональність приміщення, а й створюють безпечне середовище для роботи з технічно складним обладнанням.

Таблиця 5.2 – Параметри приміщення та нормативні вимоги [33] [34] [35]

Параметр	Вимога
Пожежонебезпечність оздоблення	Матеріали класу НГ або Г1, з негорючою фарбою
Площа та об'єм	Не менше 4,5 м ² і 15 м ³ на працівника
Кількість та ширина виходів	Мін. 1 вихід, $\geq 0,8$ м; зона безперешкодного проходу ≥ 1 м
Вентиляція	Механічна припливно-витяжна, кратність 2–3×/год; витяжка над УЗ-ванною
Мікроклімат	Темп. 18–25 °С, RH 40–60 %, швидкість повітря $\leq 0,2$ м/с
Освітлення	500 лк загальне / 750 лк комбіноване
Підлога	Антиковзна, електротошкюджена з R11, з діелектричним покриттям біля обладнання
Стіни/стеля	Світлі, гладкі, гігієнічно мийні, звукоізолюючі
Евакуаційне освітлення/знаки	≥ 1 лк, автономне живлення ≥ 1 год, згідно розмірів шляхів евакуації
Зони безпеки по УЗ/Шуму	Відстань ≥ 1 м від УЗ-генератора та акустично захищені стіни
Пожежна безпека обладнання	Відстань ≥ 1 м до розподільчих панелей електроживлення

Засоби пожежної сигналізації, зв'язку та первинного пожежогасіння

Згідно з [34], пожежна сигналізація обов'язкова: теплові датчики кожні 40–50 м², встановлені біля стелі. Аварійне освітлення з автономним живленням встановлюється по евакуаційних шляхах.

Документ [35] встановлює необхідність одного порошкового вогнегасника (ВП-5) або CO₂ (ВВК-2) на кожні 20 м², розміщеного в доступному місці, до 1,5 м від підлоги. Ємність для евакуації/чергових інструкцій – розміщена біля кожного виходу.

Висновки

У межах дослідження було проведено комплексний аналіз умов праці при експлуатації лабораторної установки для ультразвукового знезараження води з урахуванням чинних в Україні нормативно-правових документів у сфері охорони праці та санітарного законодавства. Встановлено наявність низки потенційно небезпечних та шкідливих виробничих факторів, які можуть становити загрозу здоров'ю працівників за відсутності належного інженерно-технічного і організаційного забезпечення.

У роботі здійснено обґрунтування та розробку системи заходів, спрямованих на мінімізацію впливу зазначених факторів. Особливу увагу приділено структурі вимог до безпечної експлуатації обладнання, правилам поведінки в аварійних ситуаціях, регламентам обслуговування і ремонту та рекомендовано технічні засоби індивідуального та колективного захисту відповідно до норм ДСН, ДСТУ та НПАОП.

Охорона праці виступає невід'ємним елементом науково-технічної діяльності, ефективність якої безпосередньо залежить від дотримання регламентованих вимог безпеки. Застосування описаних методик дозволяє створити безпечне виробниче середовище, а також мінімізувати можливі аварійні ситуації, що забезпечує стабільність експериментального процесу та підвищує достовірність отриманих результатів.

ВИСНОВКИ

У бакалаврській кваліфікаційній роботі досліджено та удосконалено методи підвищення рівня якості води з використанням ультразвукових технологій очищення. В результаті виконано значний обсяг теоретичних і прикладних досліджень, розроблено і випробувано експериментальну установку, а також проведено аналіз ефективності її функціонування.

У першому та другому розділах проведено огляд існуючих фізичних і фізико-хімічних методів очищення води. Розглянуто базові фізичні концепти коливань та хвиль і їхніх параметрів, та принцип дії ультразвукових хвиль. Проаналізовано відомі наукові публікації та приклади практичного застосування способів очищення води.

У третьому розділі розглянуто принцип дії ультразвукових хвиль у рідкому середовищі, а також механізми кавітації як основного чинника знезараження, а також розроблено структуру експериментальної ультразвукової установки. Описано вибір основного обладнання: генератора сигналів, підсилювача потужності, п'єзоперетворювача на 40 кГц, сталеві ємності для обробки води, термореле та циркуляційного елемента. Створено структурну схему системи, обґрунтовано вимоги до електричних параметрів та безпечності конструкції. Подано опис електричних з'єднань, засобів вимірювання (вольтметр, частотомір, осцилограф) та особливості контролю режимів роботи.

Отримані результати підтверджують, що впровадження ультразвукової обробки дозволяє суттєво підвищити показники якості води при мінімальних витратах енергії та без необхідності використання хімічних реагентів. Розроблена експериментальна установка може бути рекомендована для подальших досліджень, як навчальний елемент для демонстрації явища кавітації, а також як прототип для створення компактних локальних систем очищення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Панайотова Т. Д. Хімія води : конспект лекцій. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2021. 109 с.
2. Степова О. В., Трохименко Г. Г. Технології захисту водного середовища : навч.-метод. посіб. Миколаїв : Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, 2022. 306 с.
3. Сорокіна К. Б. Технологія очистки природних вод : конспект лекцій. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2021. 115 с.
4. ДСТУ 7525 2014 Вода питна. Вимоги та методи контролювання якості
5. ДСанПіН 2.2.4-171-10 Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною
6. ДСТУ 4808:2007 Джерела централізованого питного водопостачання. Гігієнічні та екологічні вимоги щодо якості води і правила вибирання
7. ДСТУ EN ISO 5667-1:2022 Якість води. Відбирання проб. Частина 1. Настанови щодо розроблення програм і методів відбирання проб (EN ISO 5667-1:2022, IDT; ISO 5667-1:2020, IDT)
8. ДСТУ ISO 5667-4:2003 Якість води. Відбирання проб. Частина 4. Настанови щодо відбирання проб із природних та штучних озер
9. ДСТУ ISO 5667-10:2005 Якість води. Відбирання проб. Частина 10. Настанови щодо відбирання проб стічних вод
10. ДСТУ EN ISO/IEC 17025:2019 Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій (EN ISO/IEC 17025:2017, IDT; ISO/IEC 17025:2017, IDT)
11. Галаган Р. М. Теоретичні основи ультразвукового неруйнівного контролю : підручник. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. 263 с.
12. Роїк Т.А., Черкащанко Ю.В. Діагностика і дефектоскопія матеріалів та виробів : метод. вказівки Київ : НТУУ „КПІ”, 2005. - с.

13. Галаган Р. М., Богдан Г. А. Теоретичні основи ультразвукового неруйнівного контролю : лаб. практикум: навч. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 145 с.

14. Дрозденко О. І., Паренюк Д. В. Ультразвукові технології та апарати : лаб. практикум: навч. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. 44 с.

15. Лекція №2 Фізичні властивості рідин і газів. Явище кавітації : веб-сайт. URL: <https://hydraulics.ptngu.com/lectures-two.html>

16. Jitendra Carpenter, Mandar Badve, Sunil Rajoriya, Suja George, Virendra Kumar Saharan* and Aniruddha B. Pandit (2016). Hydrodynamic cavitation: an emerging technology for the intensification of various chemical and physical processes in a chemical process industry. *Reviews in Chemical Engineering*, DOI 10.1515/revce-2016-0032, 1-36.

17. Meghdad Pirsaeheb, Negin Moradi (2020). Sonochemical degradation of pesticides in aqueous solution: investigation on the influence of operating parameters and degradation pathway – a systematic review. *RSC Adv.*, 2020, 10, 7396-7423

18. Eun Jung Lee, M.D.,¹ Anton Fomenko, M.D.,¹ Andres M. Lozano (2019). Magnetic Resonance-Guided Focused Ultrasound : Current Status and Future Perspectives in Thermal Ablation and Blood-Brain Barrier Opening. *J Korean Neurosurg Soc* 62 (1) : 10-26.

19. Yijun Han, Xinyue Yu, Zeinab Marfavi, Yumo Chen, Linxuan Zhang, Jing Chu, Kang Sun, Mingda Li,* and Ke Tao* (2024). A Perspective on Ultrasound-Triggered Production of Reactive Oxygen Species by Inorganic Nano/Microparticles. *NanoBiomed Res.* 2024, 4, 2400060, 1-13.

20. Від чого залежить кавітація у воді : веб-сайт. URL: <https://kvintal.com.ua/vid-chogo-zalezhit-intensivnist-kavitaciya-u-vodi>

21. 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 : Видавець ФОП Кушнір Ю.В., 2022. 268 с.

22. Васілевський О. М., Кучерук В. Ю., Володарський Є. Т. Основи теорії невизначеності вимірювань : підручник. Вінниця : ВНТУ, 2015. 230 с.
23. JCGM 100:2008 Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement
24. ДСТУ 2293:2014 Охорона праці. Терміни та визначення основних понять
25. ДСН 3.3.6.037-99 Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку
26. ДСанПіН 3.3.6.096-2002 Державні санітарні норми і правила при роботі з джерелами електромагнітних полів
27. НПАОП 40.1-1.21-98 (ДНАОП 0.00-1.21-98) Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів
28. ДСТУ 7237:2011 Система стандартів безпеки праці. Електробезпека. Загальні вимоги та номенклатура видів захисту
29. ДСН 3.3.6.039-99 Державні санітарні норми виробничої загальної та локальної вібрації
30. ДСТУ EN 61010-1:2014 Вимоги щодо безпечності контрольно-вимірювального та лабораторного електричного устаткування. Частина 1. Загальні вимоги (EN 61010-1:2010, IDT)
31. ДСТУ EN 50172:2019 Системи евакуаційного освітлення
32. ДСТУ EN 12464-1:2016 Світло та освітлення. Освітлення робочих місць. Частина 1. Внутрішні робочі місця (EN 12464-1:2011, IDT)
33. ДСН 3.3.6.042-99 Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень
34. ДБН В.1.1-7:2016 Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги
35. ДБН В.2.2-10:2022 Заклади охорони здоров'я. Основні положення

Додаток А



Ультразвуковий п'єзоелектричний перетворювач Chaowei 4GL-3840

Специфікація:

- Матеріал: Алюмінієвий сплав
- Потужність: 60 Вт
- Резонансна частота: $40 \pm 0,5$ кГц
- Статична ємність: $4500 \pm 10\%$ пФ
- Резонансний опір: ≤ 15 Ом
- Ізоляційний опір (250В постійного струму \geq): 100 МОм
- Діаметр: 48 мм/1,89 дюйма

Додаток Б



Генератор сигналів Rohde&Schwarz SML01

Специфікація:

Діапазон частоти: від 9 кГц до 1,1 ГГц

Роздільна здатність: 0,1 Гц

Температурний дрейф (від 0 °C до 55 °C): $<1 \times 10^{-6}$ Гц

Вихід для внутрішнього порівняння

Частота: 10 МГц

Вихідна напруга, В rms, синусоїда: $>0,5$ В на 50 Ω

Вихідний опір: 50 Ω

Вхід для зовнішнього порівняння

Частота: 10 МГц

Допустимий дрейф частоти: 5×10^{-6} Гц

Вхідна напруга, В середньоквадратичне, синусоїдальна: від 0,5 В до 2 В на 50 Ω

Вхідний опір: 50 Ω

Рівень

Діапазон: від -140 дБм до +13 дБм (перевантаження +19 дБм)

Роздільна здатність: 0,1 дБ

Точність рівня (рівень >-120 дБм)

R&S SML01 (для $f >100$ кГц): $<0,5$ дБ

Частотна характеристика при 0 дБм

R&S SML01 (для $f >100$ кГц): $<0,5$ дБ, тип. 0,3 дБ

Характеристичний опір: 50 Ω

VSWR

R&S SML01: $<1,5$

Одночасна модуляція: АМ, FM/фМ та імпульсна модуляція

Додаток В



Су-від Inkbird ISV-200W занурювальний термостат-циркулятор із Wi-Fi

Специфікація:

- Тип су-віда: Су-від занурювальний
- Максимальна ємність резервуара, літрів: 15
- Бездротовий зв'язок: 2.4 GHz Wi-Fi
- Потужність нагріву, Вт: 1000
- Вхідна напруга: 220 ~ 240 В 50 Гц
- Довжина кабелю, м: 1.2
- РК-дисплей : (Ш) 36 мм* (Д) 42 мм, 128*128
- Діапазон контролю температури: 0°C~90°C (32°F~194°F)
- Точність контролю температури: 0.1°C (1°F)

Додаток Г



Підсилювач потужності E&I 2100L 10 kHz - 12 MHz, 100 Watts

Специфікація:

Клас операції: Клас А

Частотне покриття: 10 кГц – 12 МГц

Номінальна потужність: 100 Вт, стиснення P1 дБ (де P1 дБ – рівень вихідної потужності, при якому коефіцієнт підсилення зменшується на 1 дБ від його постійного значення)

Насичена потужність: 150 Вт

Коефіцієнт підсилення потужності: 50 дБ номінальний

Рівномірність посилення: +/- 1,5 дБ

Вхідна потужність для номінального вихідного сигналу: 0 дБм (1 мВт)

Вхідний опір / КСХН: 50 Ом / 1,5:1 максимум (де КСХН – коефіцієнт стоячої хвилі напруги)

Вихідний опір / КСХН: 50 Ом / 2:1 максимум

Рівень гармонік: < -25 дБ ОС та 100 Вт вихід (де дБ ОС – відношення потужності сигналу до опорного сигналу, виражене в децибелах)

Захист: Пристрій витримує вхідний сигнал +13 дБм без пошкоджень (1,0 В середньоквадратичне значення) (де дБм – децибел-мілівати)

Перехоплення третього порядку: IP3 ~ 59 дБм

Вхід змінного струму: 100 – 240 В змінного струму 47 – 63 Гц

Температурний діапазон: 0° – 40°C

Розміри (В x Ш x Г): 5.3 x 16.5 x 18.4 дюйма / 134.5 x 420 x 467 мм

Вага: 32,5 фунтів (14,7 кг)

Роз'єми: BNC

Вхідний радіочастотний сигнал: AM, FM, SSB, імпульсний

Вхідна напруга: 1 мВт

Додаток Г



Частотомір ЧЗ-64/1

Специфікація:

Вхідні характеристики

Діапазон вимірюваних частот, Гц: $0,005 - 1,5 \times 10^9$

Рівень вхідного сигналу:

- у діапазоні 0,005 Гц-150 МГц (вхід А): для синусоїдального сигналу 0,05-10 В; для імпульсного сигналу 0,15-10 В при тривалості імпульсів $2 \times 3,5$ нс
- в діапазоні 100-1000 МГц (вхід В): для синусоїдального сигналу 0,01-1 В
- в діапазоні 1000-1500 МГц (вхід В): для синусоїдального сигналу 0,2-10 мВт

Вхідна напруга: для синусоїдального сигналу 0,05-10 для імпульсного сигналу 0,15-10

Рівень вхідного сигналу: у діапазоні 100-1000 МГц: 0,1-1 В

Рівень вхідного сигналу: у діапазоні 1000-1500 МГц: 0,2-10 мВт

Мінімальна тривалість імпульсів 0,3 мкс, частота проходження 100 Гц-1 МГц при шпаруватості 2-10000

Діапазон вимірювання тривалості імпульсів: $10 \times 10^{-9} - 2 \times 10^4$ с

Частота проходження, МГц: 50

Вхідна напруга: 0,3-10

Діапазон вимірювання тривалості інтервалів часу: 0 - 2×10^4 (вхідна напруга 0,15-10 В, роздільна здатність 1 нс)

Вхідний опір приладу на вході А, МОм: 1 або 50 Ом

Вхідна ємність приладу на вході А, пФ: 50

Вхідний опір приладу на вході Б, Ом: 50

Параметри опорного кварцового генератора

Номінальне значення частоти опорного генератора, Гц: 5×10^6

Відносна похибка за частотою опорного генератора: за 30 діб $\pm 1,5 \times 10^{-7}$

Середньоквадратична відносна випадкова варіація частоти: $< 1 \cdot 10^{-8}$

Час самопрогрівання, год: 2

Живлення: 220 В, 50 Гц; 220 В та 115 В, 400 Гц

Потужність, ВА: 180

Інтервал робочих температур, °С: від -10 до + 50

Габаритні розміри, мм: 488x133x574

Маса, кг: 22

Додаток Д



Вольтметр В7-34А

Специфікація:

Діапазон вимірювання:

Напруги постійного струму до 1000 В (0,1-1-10-100-1000 В)

Середньокв. значення синусоїдальної напруги до 500 В (1-10-100-1000 В)

Миттєвого значення напруги до 1000 В (1-10-100-1000 В)

Опору постійному струму до 10 МОм (0,1-1-10-100-1000-10000 кОм)

Відношення двох напруг постійного струму до 1000 (0,01-0,1-1-10-100-1000)

Відношення напруги постійного струму до середньокв. значення синусоїдальної напруги до 1000 (0,1-1-10-10-100-1000)

Похибка вимірювання:

напруги постійного струму $\pm[0,02+0,01(U_k/U_x-1)]$ (0,1 В),
 $\pm[0,0015+0,002(U_k/U_x-1)]$ (1, 10, 100, 1000 В);

середньокв. значення синусоїдальної напруги:

мінімальна $\pm[0,015+0,05(U_k/U_x-1)]$ (60 Гц-100 кГц; 1, 10, 100 В; 60 Гц-10 кГц; 100 В);

максимальна $\pm[2+0,25(U_k/U_x-1)]$ (200 - 500 кГц; 1, 10 В);

миттєвого значення напруги $\pm[0,04+0,02(U_k/U_x-1)]$

опору постійному струму $\pm[0,025+0,01(R_k/R_x-1)]$ (0,1 кОм),
 $\pm[0,015+0,002(R/R_x-1)]$ (1, 10, 100 кОм), $\pm[0,02+0,002(R_k/R_x-1)]$ (1000 кОм),
 $\pm[0,04+0,0005(R_k/R_x-1)]$ (10 000 кОм);

Вхідна ємність: 80 пФ

Живлення: синусоїдальна напруга 220В±22В частотою 50Гц±0,5Гц

Вхідний опір по входу H_x при вимірюванні постійної напруги і відносини двох постійних напруг у межах вимірів: $1 \cdot 10^7$ Ом $\pm 5 \cdot 10^4$ Ом (100 і 1000 В);

$2 \cdot 10^{10}$ Ом (1 і 10 В); $2 \cdot 10^9$ Ом (0,1 В)

Додаток Е



Цифровий запам'ятовуючий осцилограф DSO4254B

Специфікація:

Полоса пропускання АС — 250 МГц;

Швидкість наростання фронту імпульсів — <1,4 нс;

Кількість каналів — 4 канала + EXtrg вхід зовнішньої синхронізації;

Вхідний імпеданс — $1 \text{ МОм} \pm 2 \%$, $20 \text{ pF} \pm 3 \text{ pF}$;

Швидкість розгортки від 2 нс до 100с/діл у послідовності 1, 2, 5.

Діапазон VOLT/DIV — від 500 мкВ/діл до 10 В/діл по входу BNC;

Режим входу: AC, DC, GND.

Максимальна вхідна напруга $\pm 300 \text{ В}$ (x 10) амп.

Корекція по коефіцієнту подільника: x 1, x 10, x 100, x 1000.

Режим синхронізації: авто, норм, одинокий.

Умови синхронізації — 14 режимів

Діапазон частоти дискретизації:

1 ГВ/с — (CH1)

500 МВ/с — CH1/CH2).

Похибка вимірювання дельта часу:

$\pm(1 \text{ інтервал вибірки} + 100 \text{ ppm} \times \text{зчитування} + 0,4 \text{ нс})$.

Похибка вимірювання величини рівня:

$\pm 3\%$ для нормального, або середнього режиму отримання даних 10 В/діл до 10 мВ/діл.;

$\pm 4\%$ для нормального, або середнього режиму отримання даних 5 мВ/діл до 500 мкВ/діл.