

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ім. Ю.М. ПОТЕБНІ

КАФЕДРА ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКИ ТА ГІДРОЕНЕРГЕТИКИ

Кваліфікаційна робота

другий магістерський

(рівень вищої освіти)

на тему: «Дослідження впливу звукових коливань на теплообмінні процеси в рідині»

Виконав: студент II курсу,
групи 8.1441-з
спеціальності теплоенергетика
освітньої програми теплоенергетика

Третяк Вікторія Олександрівна

(ініціали та прізвище)

Керівник доц., к.т.н. Ільїн С.В.

(вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Рецензент доц., к.т.н., Осаул О.І.

(вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Запоріжжя

2022

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
і.м. Ю.М. ПОТЕБНІ

ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ


Кафедра Теплоенергетики та гідроенергетики

Рівень вищої освіти другий магістерський

Спеціальність 144 Теплоенергетика

Освітня програма Теплоенергетика

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри 

« 14 » 12 2022 року

З А В Д А Н Н Я

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ

Третяк Вікторія Олександрівна

(прізвище, ім'я, по батькові)

1 Тема роботи (проекту) «Дослідження впливу звукових коливань на теплообмінні процеси в рідині»

керівник роботи Ільїн Сергій Віталійович, канд. техн. наук., доцент

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

затверджені наказом ЗНУ від « 02 » липня 2022 року № 598-с

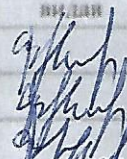
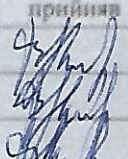

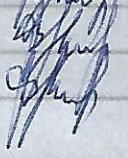

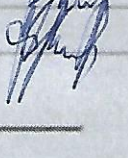
1 Строк подання студентом роботи 14 грудня 2022 року.

2 Вихідні дані до роботи: Частота ультразвуку, щільність води, теплофізичні характеристики середовища.

4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): Ультразвук і його вплив на рідину. Ультразвукові перетворювачі. Приклади інтенсифікації теплообміну за допомогою ультразвуку. Розрахунок темпу охолодження і коефіцієнту тепловіддачі. Параметри ультразвукової кавітації. Аналіз шкідливих та небезпечних факторів в лабораторії. Заходи щодо усунення шкідливих і небезпечних факторів.

5 Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): Титульний аркуш, мета та завдання роботи, експериментальні дані та графічні залежності отриманих розрахунків.

6 Консультанти розділів роботи

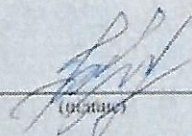
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1	Ільїн С.В., доц. каф. ТГЕ		
Розділ 2	Ільїн С.В., доц. каф. ТГЕ		
Розділ 3	Ільїн С.В., доц. каф. ТГЕ		

7 Дата видачі завдання 10.09.2022 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Срок виконання етапів роботи
1	Інтенсифікація теплообміну за допомогою ультразвуку	30.09.2021
2	Експериментальне дослідження впливу ультразвуку на теплообмін	07.10.2021
3	Охорона праці і техніка безпеки	21.11.2022
4	Оформлення дипломної роботи	30.11.2022

Студент



(підпис)

Третяк В.О.

(ініціали та прізвище)

Керівник роботи (проекту)



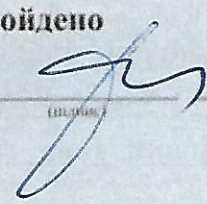
(підпис)

Ільїн С.В.

(ініціали та прізвище)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер



(підпис)

Чижов С.Є.

(ініціали та прізвище)

АНОТАЦІЯ

Третяк В.О. Дослідження впливу звукових коливань на теплообмінні процеси в рідині.

Кваліфікаційна випускна робота для здобуття ступеня вищої освіти магістра за спеціальністю 144 – Теплоенергетика, науковий керівник канд. техн. наук, доцент Ільїн С.В. Запорізький національний університет, Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні, кафедра теплоенергетики та гідроенергетики, 2022.

В ході дипломної роботи ознайомилися з сучасними пристроями інтенсифікації технологічних процесів – ультразвуковими перетворювачами, а також поняттям «кавітація», «акустична течія». Було розглянуто приклади інтенсифікації процесів теплообміну за допомогою ультразвуку. Було проведено експеримент по опроміненню трансформаторного масла, в яке була занурена розігріта пластина. На основі отриманих даних було розраховано темп охолодження і коефіцієнт тепловіддачі, параметри ультразвукової кавітації.

Ключові слова: ТЕПЛОМАСООБМІН, УЛЬТРАЗВУК, ІНТЕНСИФІКАЦІЯ, КАВІТАЦІЯ, АКУСТИЧНІ ТЕЧІЇ, УЛЬТРАЗВУКОВІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ.

ABSTRACT

Tretyak V.O. Research of the effect of sound vibrations on heat exchange processes in a liquid.

Qualifying final work for obtaining a master's degree in the specialty 144 - Heat Power Engineering, research supervisor Cand. tech. Sciences, Associate Professor Ilyin SV. Zaporozhye National University, Engineering Educational and Scientific Institute. Yu.M. Potebny, Department of Heat and Hydropower, 2022.

During the graduation work they got acquainted with modern devices of intensification of technological processes – ultrasonic transducers, as well as the concepts "cavitation", "acoustic current". Examples of intensification of heat transfer processes using ultrasound were considered. An experiment was conducted on irradiation of transformer oil, in which the heated plate was immersed. On the basis of the obtained data,

the cooling rate and heat transfer coefficient, and the parameters of ultrasonic cavitation were calculated.

Keywords: THERMAL INSTALLATION, ULTRASOUND, INTENSIFICATION, CALCULATION, ACOUSTIC FLOWERS, ULTRASONIC CONVERTERS.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1 ІНТЕНСИФІКАЦІЯ ТЕПЛООБМІНУ ЗА ДОПОМОГОЮ УЛЬТРАЗВУКУ.....	10
1.1 Ультразвук і його вплив на рідину.....	10
1.2 Ультразвукові перетворювачі.....	20
1.3 Приклади інтенсифікації теплообміну за допомогою ультразвуку..	27
1.4 Висновки до першого розділу.....	35
2 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ УЛЬТРАЗВУКУ НА ТЕПЛООБМІН.....	37
2.1 Опис експерименту.....	37
2.2 Результати експерименту.....	43
2.3 Розрахунок темпу охолодження і коефіцієнту тепловіддачі	48
2.4 Параметри ультразвукової кавітації.....	56
2.5 Висновки до другого розділу.....	58
3 ОХОРОНА ПРАЦІ І ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ.....	61
3.1 Аналіз шкідливих та небезпечних факторів в лабораторії.....	61
3.2 Заходи щодо усунення шкідливих і небезпечних факторів.....	70
3.3 Електробезпека.....	71
3.4 Пожежна безпека.....	72
3.5 Висновки до третього розділу.....	73
ВИСНОВКИ.....	75
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ.....	77
ДОДАТОК А.....	83
ДОДАТОК Б.....	84

ВСТУП

У сучасних умовах загострення економічної кризи в Україні питання енергоефективності набуває особливого значення як для держави в цілому, так і для підприємств усіх галузей народного господарства. Цінова політика на ринку енергоресурсів спонукає підприємства зменшити використання енергоресурсів, розробляти актуальні напрями енергозбереження, впроваджувати енергоефективні технології, що дозволить зменшувати енергомісткість продукції, не знижуючи її якості.

Питання підвищення ефективності роботи установок промислової теплотехніки, збільшення кількості отриманої продукції з одиниці виробничої площі і зменшення питомих витрат тепла мають важливе значення, так як поширення таких установок повсюдне, а кількість споживаного ними палива досить велика. Паливо є основним енергетичним ресурсом, і будь-яка його перевитрата протягом скільки-небудь тривалого часу веде до підвищення собівартості продукції.

Теплообмінні апарати – найбільш поширені пристрої в усіх видах і типах енергетичних і масообмінних установок. Теплообмінні апарати знайшли широке застосування в багатьох областях енергетичної, господарської, авіаційно-космічної, хімічної, нафтопереробної, харчової промисловості, холодильної та криогенної техніки, в системах опалення, гарячого водопостачання, кондиціонування. Тому необхідно прагнути, щоб теплообмінник забезпечував по можливості найбільш високі параметри теплообміну.

В даний час існують два основних напрями інтенсифікації теплообміну через стінку: розвиток поверхні теплообміну і збільшення термодинамічних характеристик теплоносія.

Розвиток поверхні теплообміну полягає в додаванні ребрення, шипів і інших елементів, що дозволяють не тільки збільшити її площу, а й

турбулізувати потік поблизу стінки. Однак, не завжди є можливість збільшення площі теплообміну.

До основних термодинамічних характеристик теплоносія, що визначає ефективність теплопереносу відносяться: температура і швидкість поблизу поверхні теплообміну. Їх збільшення також дозволяє збільшити тепловий потік. Однак, як і у випадку з ребрами, цей напрям інтенсифікації теплообміну має ряд обмежень.

Одним з перспективних способів інтенсифікації теплообміну може стати використання ультразвуку. Вплив високочастотних коливань на теплоносій призводить до активації мікротечій в середовищі і забезпечує інтенсивне перемішування навіть в пристінному шарі. Ультразвук дозволяє скоротити товщину ламінарного підшару або повністю виключити його виникнення.

Інтенсифікація теплообміну за допомогою ультразвуку дозволить вирішити такі завдання:

- збільшити теплові навантаження, що відводяться, при заданих тисках та масових швидкостях;
- зменшити габарити і металоємність теплообмінника;
- зменшити час охолодження елементів різних пристроїв;
- перешкоджати створенню з'єднань кальцію на поверхні теплообміну, що дозволить суттєво знизити експлуатаційні витрати.

Дослідженню ультразвуку та його впливу на теплообмін присвятили свої праці такі вітчизняні та закордонні вчені: Хмельов В. Н., Розенберг Л. Д., Агранат Б. А., Кубанский Н. П., Берман Л., Леонг Т., Стофорос Дж., Легай М., Моннот А., Гондрексон Н., Яо І. та інші.

Метою даної роботи є дослідити вплив ультразвуку на теплообмін.

Постановка мети визначила рішення наступних завдань:

- дослідити сутність ультразвуку та його вплив на рідину, розглянути основні ультразвукові перетворювачі, проаналізувати існуючі досягнення в області інтенсифікації теплообміну за допомогою ультразвуку;

- експериментально дослідити вплив ультразвуку на охолодження розігрітої пластини в масляному середовищі;
- на основі отриманих даних розрахувати темп охолодження і коефіцієнт тепловіддачі;
- розрахувати параметри ультразвукової кавітації.

Об'єктом дослідження є вплив ультразвуку на процес теплообміну.

Предметом дослідження дипломної роботи є значення коефіцієнту тепловіддачі при використанні ультразвуку та без нього.

Методи дослідження – експеримент, порівняння, розрахунок.

Інформаційною базою дослідження стали нормативні документи, наукові праці провідних вітчизняних і зарубіжних вчених з питань ультразвуку та його впливу на теплообмін, результати проведених експериментів.

Дипломна робота складається з вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел. У першому розділі дипломної роботи проведено аналіз теоретичних основ інтенсифікації теплообміну за допомогою ультразвуку. Другий розділ дипломної роботи присвячений експериментальному дослідженню впливу ультразвуку на теплообмін. Третій розділ присвячений охороні праці та техніці безпеки.

1 ІНТЕНСИФІКАЦІЯ ТЕПЛООБМІНУ ЗА ДОПОМОГОЮ УЛЬТРАЗВУКУ

1.1 Ультразвук і його вплив на рідину

Акустика (від грец. «akustikos» – слуховий) в широкому сенсі – це область фізики, що вивчає виникнення, поширення і взаємодію з речовиною звукових хвиль від самих низьких частот до найвищих; у вузькому сенсі – вчення про звук [1].

Найбільш цікавим для нас є напрямлення акустики, що вивчає ультразвук.

Ультразвук являє собою механічні коливання пружного середовища, що займають область вище 20000 Гц. Верхня межа спектра ультразвукових коливань не встановлена [2].

В даний час ультразвук широко застосовується в різних галузях науки і промисловості. Для різних цілей використовують фізичні, хімічні та біологічні дії ультразвуку [3]. Дія ультразвуку пояснюється його властивостями.

Будь-яка хвиля як коливання, що розповсюджується в часі і в просторі, може бути охарактеризована частотою, довжиною і швидкістю хвилі.

Частота (f) — це кількість коливань, що здійснює система в одиницю часу. Одиницею виміру є Герц (Гц) [4].

Швидкість поширення звукових хвиль в рідині визначається за формулою, м/с

$$c = \sqrt{\frac{l}{k \cdot \rho}}, \quad (1.1)$$

де k – коефіцієнт стискання рідини, тобто відносна зміна її об'єму при зміні тиску, що рівний одиниці. Для води цей коефіцієнт дорівнює $k=4,7 \cdot 10^{-11}$ Па⁻¹;

ρ – щільність води, кг/м³.

Щільність води (при 8 °С) дорівнює 0,998 кг/м³, і, згідно формулі (1.1), швидкість звуку в воді дорівнює 1440 м/с. тобто приблизно в 4,5 рази більше швидкості звуку в повітрі [5].

Поряд з частотою характерним параметром кожного звукового коливання є довжина хвилі (λ), тобто відстань, яке звукова хвиля проходить за час одного повного коливання. З цього визначення випливає основне співвідношення, що зв'язує частоту звукових коливань f і довжину хвилі λ зі швидкістю поширення звуку c в даному середовищі. Справді, якщо за час одного повного коливання звукова хвиля проходить шлях, рівний λ , то за секунду вона пройде в f раз більше, так як протягом секунди робить f повних коливань. З іншого боку, шлях, прохідний хвилею протягом секунди, це її швидкість поширення в даному середовищі. Таким чином, можна записати формулу

$$c = \lambda \cdot f. \quad (1.2)$$

З цього співвідношення випливає, що для кожної середовища довжина хвилі і частота обернено пропорційні: чим більше частота, тим менше довжина хвилі [6].

Амплітуда коливань A являє собою максимальне зміщення частинки з положення рівноваги під час її коливального руху, викликаного збудженням частинок середовища.

Період коливань T – це час, необхідний частці для здійснення одного коливального руху [4].

Коли ультразвук впливає на дно посудини з рідиною, в ній виникають наступні ефекти, які показано на рисунку 1.1 [7]:

- нагрівання за рахунок розсіяння акустичної енергії;
- акустична кавітація;
- акустичні течії;
- акустичне джерело і розпилення.

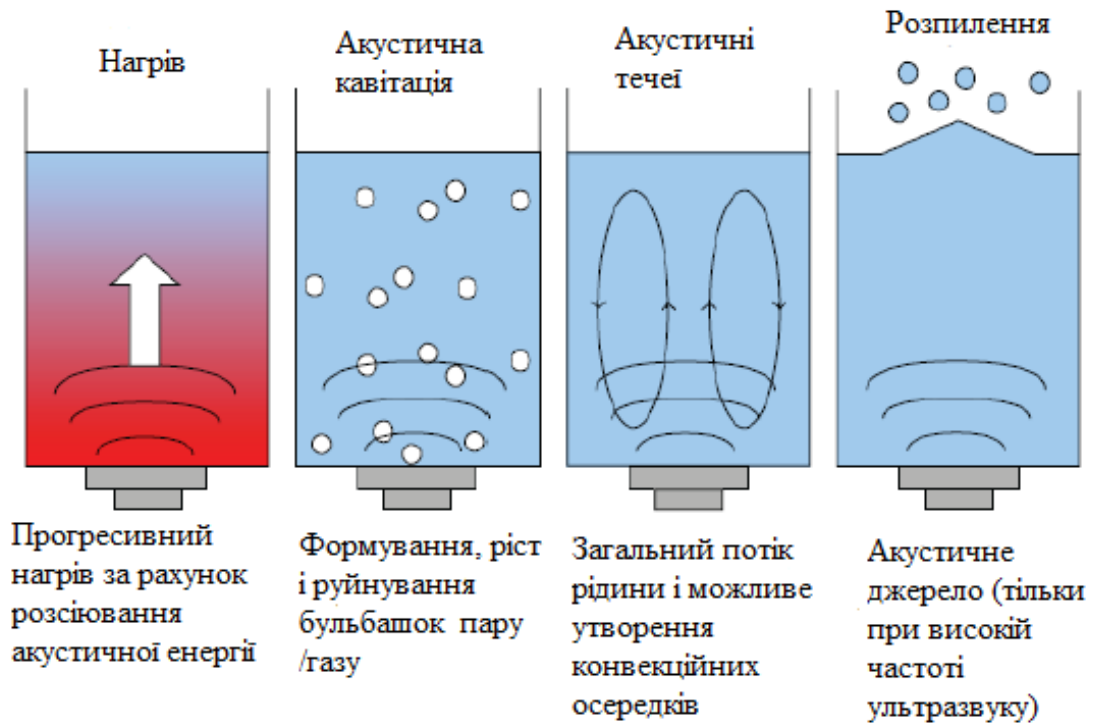


Рисунок 1.1 – Ефекти, що виникають в результаті поширення ультразвуку в рідинах

Найбільш важливими явищами для інтенсифікації теплообміну в рідині є акустична кавітація та акустична течія.

Кавітація являє собою процес нестійкої зміни розмірів парогазових бульбашок при знакозмінному тиску в рідині [8].

По суті кавітація є не що інше, як кипіння рідини, тільки при кипінні рідини бульбашки, що виникають, являють собою бульбашки пара, а при кавітації бульбашки можуть бути як парові, так і газові [9].

Розрізняють гідродинамічну кавітацію, що виникає за рахунок місцевого зниження тиску в потоці рідини при обтіканні твердого тіла, і

акустичну кавітацію, що виникає при проходженні через рідину акустичних коливань [10]. Тобто на відміну від гідродинамічної кавітації, коли розриви відбуваються в результаті зниження тиску в струмені рідини, що рухається, при акустичній кавітації причиною розривів є змінні тиски, створювані в об'ємі рідини джерелом ультразвукових коливань [11].

Розглянемо детально процес формування кавітації в рідині, який зображено на рисунку 1.2 [12].

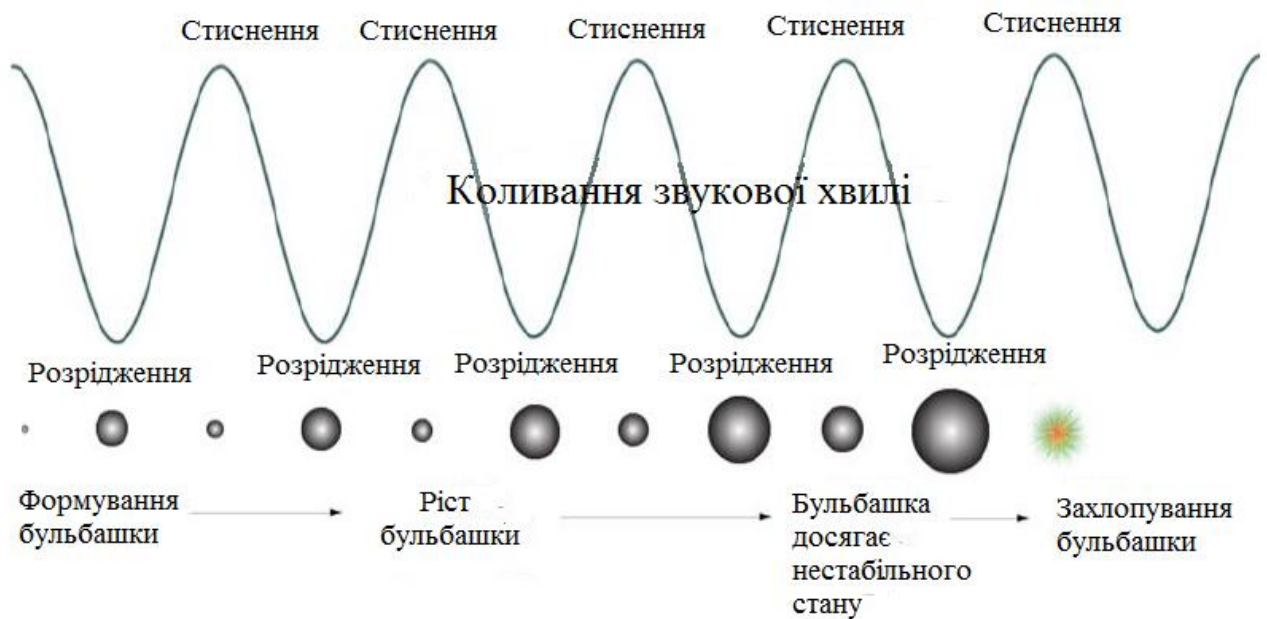


Рисунок 1.2 – Формування, ріст і захопування бульбашок

На рідину діє ультразвук малої інтенсивності. Ультразвукова хвиля, проходячи через рідину, створює зони стиснення і зони розрядження, що міняються місцями кожен напівперіод хвилі. Виникаючий при цьому знакозмінний тиск можна підрахувати за формулою, Па

$$P = \sqrt{\rho \cdot c \cdot I}, \quad (1.3)$$

де I – інтенсивність ультразвуку, Вт/м².

При цьому частинки середовища коливаються з малими амплітудами (частки мікрометра) і величезними прискореннями, порядку $10^5 \cdot g$.

При збільшенні інтенсивність до 10000 Вт/м^2 з'явиться порушення однорідності рідини. У фазу розрядження (зниженого тиску) в найбільш «слабких» місцях починається виділення розчинених газів з утворенням бульбашки [4]. Ці «слабкі» місця називаються зародки кавітації.

Зародками кавітації можуть бути дрібні бульбашки газу, нерозчиненого в рідині, а також не змочувані тверді частинки [11].

Існуючі бульбашки під дією від'ємного тиску починають колитися. Миттєвий тиск зменшується до такого ступеня, що бульбашки не можуть залишатися стабільними, тому бульбашки збільшують свій об'єм до нового рівноважного значення.

Першою причиною росту бульбашок є злиття бульбашок. Тобто, коли дві бульбашки зустрічаються, вони об'єднуються в одну велику бульбашку.

По-друге, розмір бульбашки може збільшуватися під дією ультразвукових коливань. При коливанні бульбашки розмір бульбашки збільшується і росте до тих пір, доки не досягне критичного розміру, що називається резонансним розміром. Резонансний розмір бульбашки залежить від частоти ультразвуку.

Резонансний радіус бульбашки можна знайти за формулою

$$R_p = \sqrt{\frac{3 \cdot \gamma \cdot p}{\rho \cdot \omega^2}}, \quad (1.4)$$

де $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$ – питома теплоємність газу всередині бульбашки;

p – тиск рідини, Па;

ω – кутова частота ультразвуку, с^{-1} [12].

Є дві можливості, після того, як бульбашка досягла резонансного розміру: бульбашка продовжує коливатися в межах резонансного розміру (стабільна кавітація) або бульбашка захоплюється (нестабільна кавітація) [13].

При захопленні кавітаційної бульбашки виникає ударна хвиля, що розвиває величезний тиск. Якщо ударна хвиля зустрічає на своєму шляху перепону, то вона руйнує її поверхню [14].

Саме це пояснює, чому кавітація є важливим явищем для інтенсифікації теплообміну за допомогою ультразвуку. Дійсно, захоплення бульбашки поблизу кордону розділу твердої поверхні і рідини руйнує термічні та швидкісні пограничні шари, тим самим зменшуючи тепловий опір і створюючи мікротурбулентність, що було схематично показано на рисунку 1.3 [15].

При роботі потужного ультразвукового випромінювача в технологічному об'ємі рідини виникає кавітаційна область, що представляє собою скупчення кавітаційних бульбашок [8].

Ще одним важливим для інтенсифікації теплообміну явищем, що виникає під дією ультразвуку є акустична течія.

Акустичними течіями зазвичай називають стаціонарні вихрові потоки рідини чи газу, що виникають в звуковому полі. Розповсюдження інтенсивних звукових і особливо ультразвукових хвиль в газах і рідинах, як правило, супроводжується виникненням таких вихрових потоків. Ці потоки виникають як в вільному неоднорідному звуковому полі, так і особливо поблизу перешкод різного роду, що розміщені в звуковому полі, чи поблизу тіл, що коливаються [16].

Спочатку такі течії отримали назву «кварцового вітру» в зв'язку з тим, що інтенсивні ультразвукові пучки отримували за допомогою п'єзоелектричних пластинок. Оскільки ж в даний час існує багато різних способів збудження потужного ультразвуку, природно цей ефект називати ультразвуковим вітром.



Типовий пограничний шар швидкості

Кавітація

Зміна профілю приграничного шару

Рисунок 1.3 – Інтенсифікація теплообміну за допомогою ультразвукової кавітації

Ці течії обумовлені діючим уздовж ультразвукового пучка радіаційним тиском, який в реальному дисипативному середовищі пов'язаний з поглинанням в ній енергії ультразвукової хвилі [17].

В даний час відомі три типи акустичних потоків.

Перший – це течії, що виникають у в'язкому приграничному шарі біля кордону розділу фаз і поблизу перешкод, поміщених в звуковому полі. Теорія цих потоків вперше була дана Шліхтінгом [18], який продемонстрував, що під дією звуку стаціонарні потоки в прикордонному шарі мають вихровий характер. Масштаби прикордонних вихорів визначаються товщиною приграничного шару, за розміром вони значно менше довжини хвилі і відносяться до дрібномасштабних течій.

З цих течій особливо слід виділити течії, що виникають у поверхні кавітаційних порожнин, що коливаються і утворюються на кордоні з твердим тілом, поміщеним в кавітуючу рідину. За величиною швидкості і турбулентності ці течії набагато перевершують стаціонарні течії, що виникають в акустичному полі, і за наявності розвиненої кавітації області можуть робити істотний вплив на формування стаціонарних акустичних потоків.

Другий тип акустичних потоків – це течії поза приграничного шару, які також мають вихровий характер. Масштаб цих течій можна порівняти з довжиною хвилі. Один з видів такого перебігу – двовимірна течія між плоскими пластинами (або в циліндричній трубці) – був розглянутий Релеєм [19]. Вихори в цьому випадку мають масштаб, рівний довжині звукової хвилі, в ці течії можна віднести до середньомасштабні течіям.

Третій тип – це течії у вільному неоднорідному звуковому полі. Масштаб вихорів цих потоків визначається величиною об'єму рідини і істотно більше довжини хвилі. Такі течії відносяться до великомасштабних і називаються еккартовскими в честь Еккарта, який першим вирішив задачу про акустичні потоках в обмеженому обсязі. Характерною особливістю цієї течії є формування потоку, спрямованого по осі від випромінювача.

Швидкість стаціонарних акустичних потоків менше амплітуди коливальної швидкості в звуковій хвилі. Такі течії називаються повільними. Теорія акустичних течій розроблена в даний час тільки для повільних течій. Основну роль в стабілізації швидкості потоків грають сили в'язкого тертя. Відхилення від теорії спостерігаються при невеликій інтенсивності звуку навіть при відсутності кавітації в рідині.

Роль акустичних течій в ультразвуковій технології зводиться до наступного:

1. Потоки на межі рідина-тверде, рідина-рідина, рідина-газ сприяють прискоренню процесів масо- і теплообміну, швидкість яких лімітується товщиною прикордонного шару.

З усіх видів течій найбільшу роль в ультразвуковій технології мають дрібномасштабні течії, особливо вихрові потоки в околицях кавітаційних бульбашок. Специфіка цих потоків полягає не тільки у високому ступені турбулентності, але і в тому, що кавітаційні бульбашки, формуючись в порах, тріщинах і нерівностях поверхні твердого тіла, інтенсивно перемішують рідину в прикордонному шарі в місцях, недоступних для звичайного механічного перемішування.

Поглинання звуку в розвиненій кавітаційній області призводить до утворення біля області потужних течій, швидкість яких істотно залежить від ерозійної активності кавітаційної області.

2. Середньо- і великомасштабні течії сприяють протіканню процесів масо-і теплообміну у всьому об'ємі рідини [11].

На рисунку 1.4 зображене покращення конвективного теплообміну за допомогою акустичної течій [15].

Вісесиметрична і плоска акустична течія біля стінки створюють помітний вплив на теплообмін, як при природній, так і при вимушеній конвекції. Ці течії направлені по нормалі до поверхні і глибоко проникають в пограничний шар і ламінарний підшар. Як наслідок цього, стан пограничного шару і ламінарного підшару зазнає різні зміни, такі як деформація шару,

зміщення його в інше положення, турбулізація. Результатом цих змін є інтенсифікація процесу теплообміну [20].

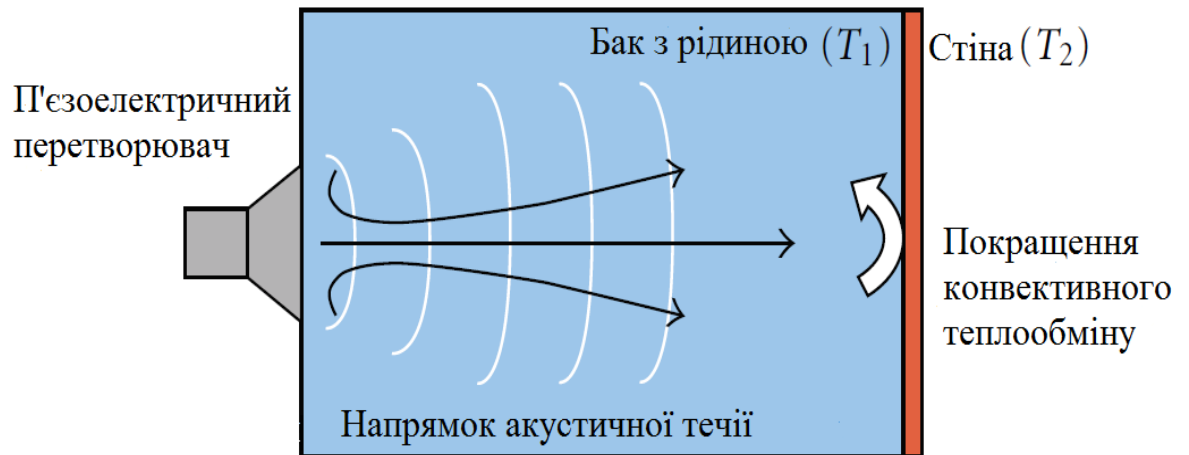


Рисунок 1.4 – Покращення конвективного теплообміну за допомогою акустичної течії

Отже, можна зробити висновок, що ультразвук — це звукові коливання, що мають частоту вище 20 кГц. Будь-яка хвиля як коливання, що розповсюджується в часі і в просторі, може бути охарактеризована частотою, довжиною і швидкістю хвилі.

Під дією ультразвуку в рідині виникають наступні явища: нагрівання за рахунок розсіяння акустичної енергії; акустична кавітація; акустичні течії; акустичне джерело і розпилення. Найбільш важливими для інтенсифікації теплообміну є акустична кавітація і акустичні течії.

Кавітація – це поява маленьких бульбашок заповнених паром і газом під дією розтягуючи зусиль в області розрідження хвилі. Кавітаційна бульбашка має декілька етапів життя: формування, ріст і захлопування. Під час захлопування виникає ударна хвиля високого тиску, що руйнує пограничний підшар і тим самим покращує теплообмін.

Акустична течія – це стаціонарні вихрові потоки рідини або газу, що виникають у вільному неоднорідному звуковому полі, а також поблизу

перешкод і тіл, що коливаються, поміщених в звукове поле. Розрізняють течії трьох типів:

а) шліхтингова течія – течії, що виникають в в'язкому приграничному шарі поблизу перешкод, і мікротечії біля бульбашок, що коливаються;

б) релеєвська течія – течії поза прикордонним шаром;

в) еккартовська течія – макротечії в вільному неоднорідному звуковому полі, в якому масштаб неоднорідності значно більше довжини хвилі.

Потоки, що виникають в прикордонному шарі, зменшують його товщину і прискорюють процес теплообміну.

Далі необхідно розглянути пристрої, які створюють ультразвук.

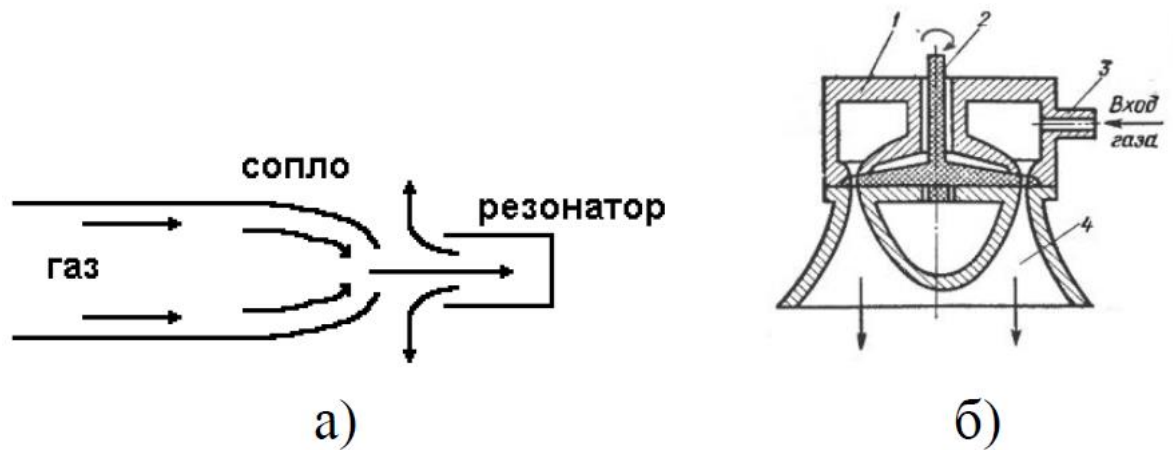
1.2 Ультразвукові перетворювачі

Ультразвуковий перетворювач – це пристрій, який може перетворювати електричну енергію в звукові хвилі високої частоти і навпаки [21].

Ультразвукові випромінювачі поділяють на дві основні групи: механічні і електромеханічні.

Механічні випромінювачі в залежності від технологічного призначення та середовища, в якій відбувається їх експлуатація, підрозділяються на аеродинамічні і гідродинамічні. Аеродинамічні випромінювачі призначені для роботи в газових середовищах. Практичне застосування отримали в технологічних апаратах (коагуляційні установки, сушарки та ін.) у вигляді динамічних (оберткових) і статичних (свисткових) сирен [22]. Аеродинамічні випромінювачі зображено на рисунку 1.5.

Статичні сирени – це генератори звукових та ультразвукових коливань, які не мають рухомих частин, джерелом енергії служить кінетична енергія руху газової течії. Динамічні сирени представляють собою аеродинамічні випромінювачі з можливістю періодичного відкриття та закриття отворів резонаторів за рахунок обертання роторного пристрою.

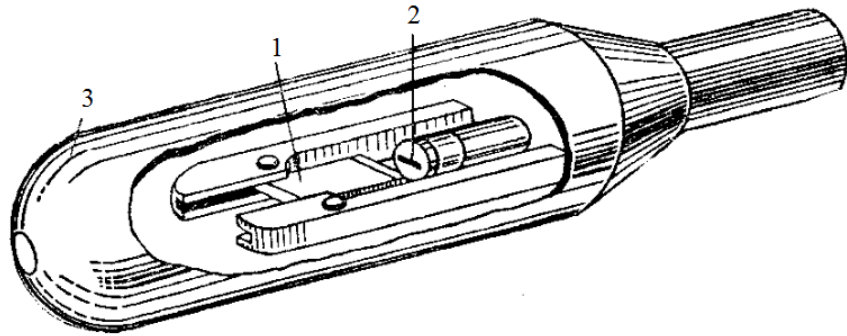


а) статична сирена; б) динамічна сирена: 1 – камера; 2 – ротор; 3 – вхідний патрубок; 4 – ротор.

Рисунок 1.5 – Аеродинамічні випромінювачі

Аеродинамічні випромінювачі забезпечують збудження ультразвукових коливань в газових середовищах і можуть бути використані для пришвидшення процесів в газових середовищах. Робоча частота аеродинамічних випромінювачів не перевищує 20-50 кГц [4].

У гідродинамічних випромінювачів акустичні коливання виникають в результаті резонансних коливань пластини або стрижня від пружного струменя рідини, яка витікає з сопла (пластинчасті і стрижневі випромінювачі), або в результаті зриву вихорів і утворення звукових хвиль за рахунок імпульсів тиску, що виникають при закритті кавітаційних бульбашок (вихрові випромінювачі), а також в результаті виникнення пульсацій тиску при обертанні ротора і швидкому чергуванні суміщень і несуміщення щілин (прорізів) або отворів статора і ротора (роторні випромінювачі). Гідродинамічні випромінювачі отримали широке застосування в установках для інтенсифікації процесів гомогенізації (змішування), емульгування і ін. Робоча частота таких випромінювачів не перевищує 20 кГц [22]. Приклад гідродинамічного випромінювача зображено на рисунку 1.6 [23].



1 – пластина; 2 – сопло; 3 – балон.

Рисунок 1.6 – Гідродинамічний випромінювач в акустично налаштованому балоні

За допомогою електромеханічних випромінювачів можна створювати механічні коливання в межах від десятків герц до сотень мегагерц. Однак коливання УЗ діапазону здатні генерувати тільки магнітострикційні і п'єзоелектричні випромінювачі [22].

Магнітострикційний ефект був відкритий Джоулем в 1847 р. Джоуль виявив, що ферромагнітне тіло при намагнічуванні змінює свої геометричні розміри, тобто деформується. Існує також зворотний магнітострикційний ефект, що полягає в зміні намагніченості тіла при його деформації.

У ферромагнетиці можливі два види магнітострикції: лінійна, при якій відбувається зміна геометричних розмірів тіла в напрямку прикладеного поля, і об'ємна, при якій геометричні розміри тіла змінюються у всіх напрямках. У магнітострикційних перетворювачів використовується лінійна магнітострикція [24].

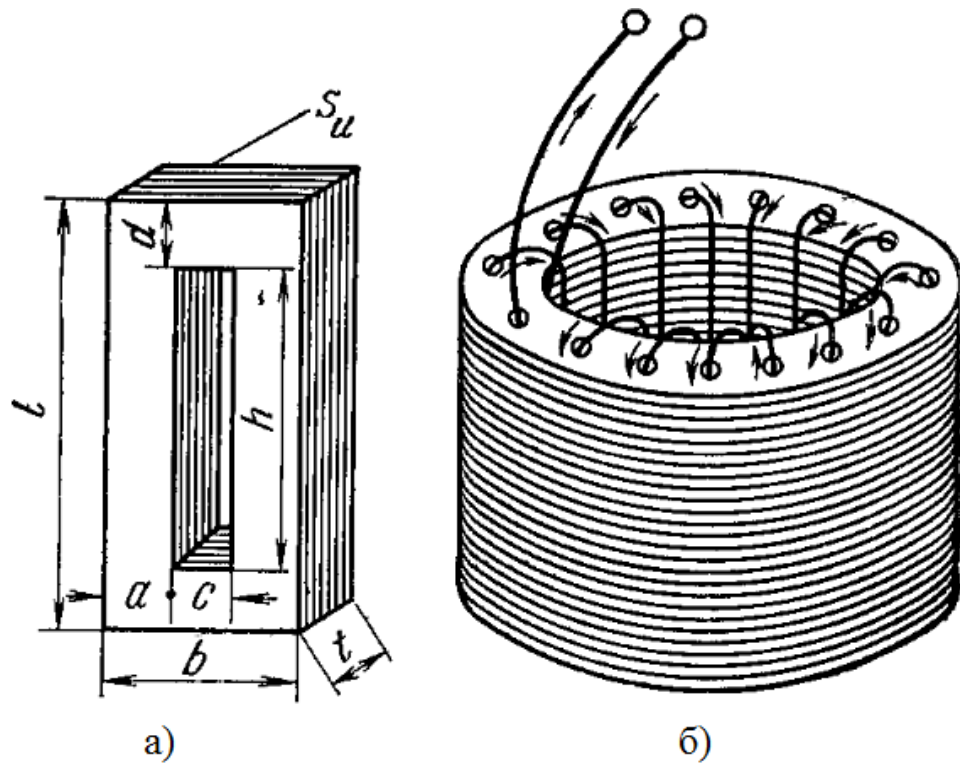
Серед різних магнітострикційних матеріалів найбільше застосування в промисловості знайшли нікель, сплави заліза з алюмінієм (Альфер 12Ю, Альфер 14Ю), заліза з кобальтом (пермендюр 65К), заліза з кобальтом і ванадієм (пермендюр 49КФ2, 49КФ), нікелю з алюмінієм, нікелю з кобальтом, заліза з нікелем [22]. Основні характеристики магнітострикційних матеріалів представлено в Додатку А [25].

У 1951 р академік М.М. Андрєєв запропонував використовувати в якості магнітострикційних матеріалів ферити. Порівняльна дешевизна і простота виготовлення робить застосування феритових магнітострикційних перетворювачів вельми перспективним. Властивості феритів (Ферит Ф-21, Феррит Ф-38, Феррит Ф-41, Феррит Ф-42, Феррит 21СПА, Віброкс I, Віброкс II, Феррокуб 7А, Феррокуб 7А2, Феррокуб 7В) в основному залежать від складових (оксиди заліза, цинку, закис нікелю). Ферити стійкі проти корозії, мають значно меншу залежність частоти від температури, володіють значним магнітострикційним ефектом, близьким до нікелю. У феритів електричний опір в $10^8 - 10^{10}$ разів більше, ніж у металів, тому втрати на вихрові струми в них практично відсутні. Однак у феритів є недолік – мала механічна міцність, що не допускає їх перевантажень при роботі в коливальних системах великої потужності. Механічні напруги, що в матеріалі, призводять до виникнення тріщин, а потім і до руйнування феритового сердечника випромінювача [22].

Найпростіший магнітострикційний випромінювач – це стрижень, виготовлений з металу, що володіє магнітострикцією; на цей стрижень надягається котушка. Коли по обмотці котушки пропускається струм, в ній виникає змінне магнітне поле, і стрижень в такт з коливаннями струму періодично стискається і розширюється, тобто здійснює механічні коливання переважно в поздовжньому напрямку. Торць стержня при таких коливаннях випромінює звукові або ультразвукові хвилі [9].

В ультразвукових технологічних пристроях найбільше застосування отримали два різновиди магнітострикційних перетворювачів: продольно-коливаючийся двухстрижневий і радіально-коливаючийся кільцевий (див. рис. 1.7) [25].

П'єзоелектричний перетворювач електричної енергії в механічну енергію коливань являє собою пристрій, що складається з активного елемента, що володіє п'єзоелектричними властивостями, електродів і, в ряді випадків, утримувачів [26].



а) продольно-коливаючийся двухстрижневий; б) радіально-коливаючийся кільцевий

Рисунок 1.7 – Сердечники магнітострикційних перетворювачів

Сутність його полягає в тому, що при певних типах кристаллографічної симетрії в результаті формування кристала виникає прямий п'єзоелектричний ефект, коли на гранях кристала з'являються електричні заряди, пропорційні величині деформації. Має місце і зворотний п'єзоелектричний ефект, що полягає в тому, що в кристалах, поміщених в електричне поле, виникають внутрішні напруження, пропорційні напруженості поля, при цьому під дією електричних зарядів деформується (змінюються розміри) кристал.

Під впливом зовнішньої сили кристалічна решітка змінює свій стан. Деформація решітки, що викликається механічною напругою, призводить до перерозподілу електричних зарядів. Однак не при будь-якому розташуванні диполів в кристалі дія механічної сили призводить до деформації, а коли змінюється дипольний момент, тобто відстань між центрами тяжіння

різноїменних зарядів. Це можливо тільки при наявності полярних напрямків, які є у кристалів, що не володіють центром симетрії [22].

П'єзоелектричний ефект був виявлений у кристалів турмаліну, кварцу, цинкової обманки, хлората натрію, винної кислоти, кремнекислого гальмея, тростікового цукру, сегнетової солі і багатьох інших кристалів [27]. В науці і техніці отримали застосування синтетичні п'єзоелектричні матеріали: титанат барію (ТБ-1), титанат барію кальцію (ТБК-3), титанат-цирконат свинцю (ЦТС-19, ЦТС-23, ЦТБС-3, ЦТСНВ-1, PZT-5Н, PZT-8 та ін.). У титаната барію п'єзоелектричний ефект в 50 разів більше, ніж у кварцу при дуже невеликій вартості [22].

У Додатку Б наведені основні характеристики ряду п'єзоелектричних матеріалів [26].

Найбільшого поширення в ультразвукової техніки в даний час отримали плоскі, стрижневі, циліндричні і сферичні п'єзоелектричні випромінювачі.

Плоскі п'єзоелектричні випромінювачі є пластини прямокутної або круглої форми, виготовлені з п'єзокерамічного матеріалу (рисунок 1.8). Товщина пластини d дорівнює половині довжини хвилі, тому їх називають напівхвильові випромінювачі:

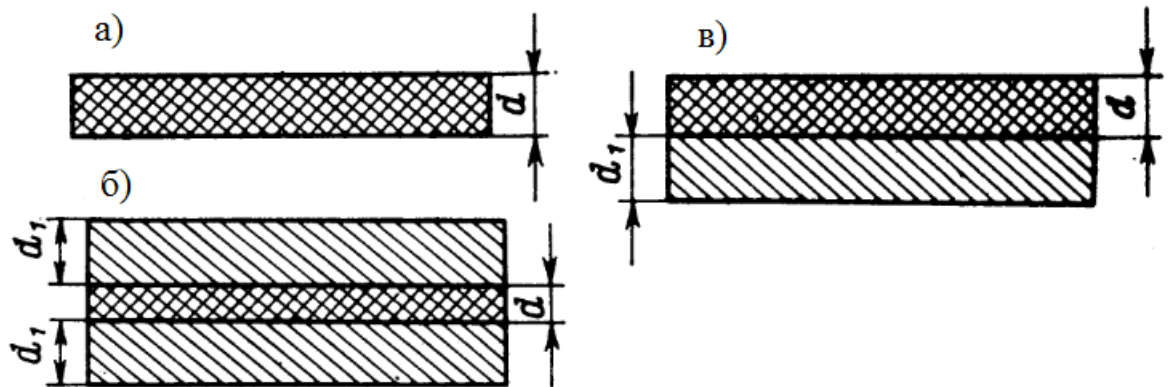
Крім напівхвильових випромінювачів відомі чверть хвильові і багатошарові випромінювачі.

Чвертьхвильовий випромінювач являє собою систему, що складається з двох жорстко з'єднаних пластин, одна з яких виготовлена з п'єзокераміки і має товщину $d=\lambda/4$ (λ – довжина хвилі в п'єзоелементі), а друга – з металу $d_1=\lambda_1/4$ (λ_1 – довжина хвилі в металі).

Багатошаровий випромінювач складається з двох металевих накладок і тонкої п'єзокерамічної пластинки між ними [22].

Плоскі п'єзоперетворювачі зображено на рисунку 1.8 [24].

Циліндричні п'єзоперетворювачі можуть бути засновані на використанні поперечного та поздовжнього п'єзоефекту.



а) напівхвильовий; б) чвертьхвильовий; в) багатошаровий.

Рисунок 1.8 – Плоскі п'єзоперетворювачі

Розглянемо п'єзоелектричний випромінювач, робота якого заснована на поперечному ефекті. Такий випромінювач являє собою циліндр, виготовлений з кераміки, на зовнішню і внутрішню бічні поверхні якого нанесені електроди. Під дією змінної напруги періодично змінюється довжина середньої окружності циліндра, що призводить до виникнення у нього радіальних коливань.

Циліндричний п'єзоперетворювач, робота якого заснована на поздовжньому п'єзоефекті, конструктивно виконується у вигляді набору призматичних п'єзоелементів, що встановлюються по колу циліндра довгою стороною призми уздовж твірної. Електроди розташовуються між сусідніми призмами, з'єднуючись між собою через один.

Стрижневі п'єзоелектричні перетворювачі конструктивно виконуються у вигляді призматичних або циліндричних п'єзоелементів, кожен з яких встановлюється на металевому резонансній підставі. Елементи працюють на поперечному п'єзоефекті при коливаннях по довжині [26].

Сферичні п'єзоелектричні перетворювачі дозволяють отримати велику концентрацію акустичної енергії в невеликому обсязі [22].

Отже, можна зробити висновок, ультразвукові перетворювачі – це пристрої, що перетворюють електричну енергію в механічну (випромінювачі), або навпаки, механічну енергію в електричну (приймачі).

Їх можна поділити на дві групи: механічні і електромеханічні. Механічні в свою чергу поділяються на аеродинамічні і гідродинамічні.

Найбільший інтерес для нас представляють магнітострикційні і п'єзоелектричні випромінювачі, оскільки вони генерують ультразвук високої частоти.

Тепер на прикладах розглянемо як саме ультразвук впливає на теплообмін.

1.3 Приклади інтенсифікації теплообміну за допомогою ультразвуку

Вплив ультразвуку на теплообмін є мало вивченою областю, яка набирає все більшу популярність. Розглянемо нижче декілька досліджень.

Кубанский Н. П. одним з перших запропонував використовувати ультразвук для інтенсифікації теплообміну.

У своєму патенті [28] Кубанский Н. П. пропонував поверхню теплообміну із застосуванням інтенсифікації за рахунок звукових або ультразвукових коливань. У пропонованому винаході інтенсифікація теплообміну досягається резонаторами для збудження коливань звуковими або ультразвуковими хвилями, розрахованими на певну власну частоту коливань, що відповідає довжині хвилі збудника, і виконаними на поверхні теплообміну у вигляді поглиблень однакової форми. На рисунку 1.9 зображені можливі форми виконання резонаторів на поверхні нагрівання або охолодження.

Для повного руйнування прикордонного шару між потоком і поверхнею за допомогою звукових і ультразвукових коливань пропонується особлива конструкція поверхні нагрівання (або охолодження). Відмінність пропонованої конструкції полягає в тому, що поверхні нагрівання

повідомляються особливі акустичні властивості, шляхом влаштування на ній системи з багатьох однакових резонаторів. Власна частота кожного резонатора повинна збігатися з частотою ультразвукових коливань, якими обурюється рухомий потік газів.

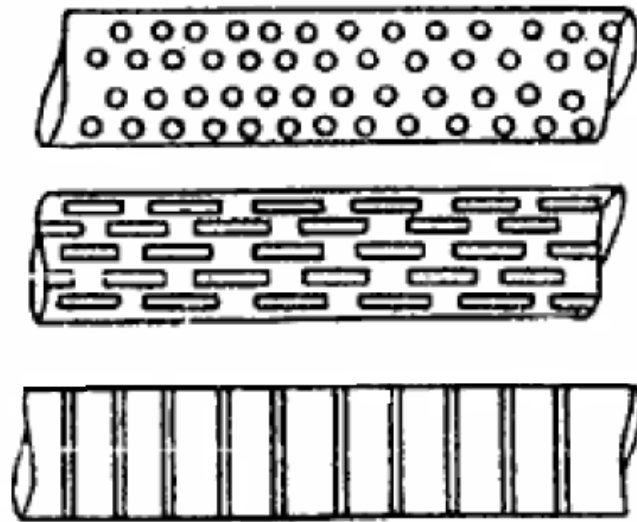


Рисунок 1.9 – Форми виконання резонаторів на поверхні нагріву чи охолодження

Резонатори можуть мати різну форму – циліндричну, жолобову, кільцеву і т.д. Частота власних коливань резонатора, наприклад, циліндричної, форми може бути підрахована за такою відомою формулою

$$\frac{\lambda}{4} = l + 0,3 \cdot d, \quad (1.5)$$

де λ – довжина хвилі, м;

l – глибина резонатора, м;

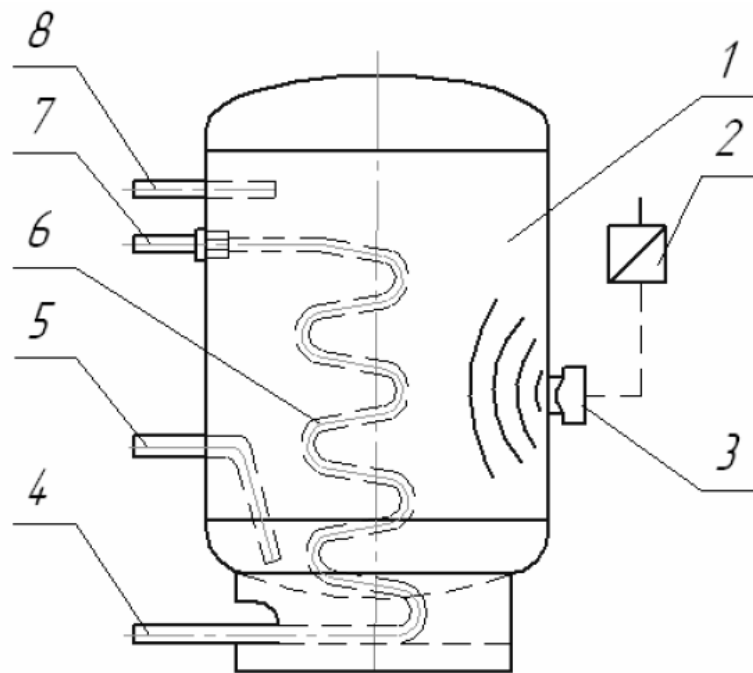
d – діаметр резонатора, м.

Принцип дії такої поверхні нагрівання наступний: в момент проходження фази стиснення резонатори заповнюються газом, а в момент проходження фази розрідження таз виходить з резонаторів. Зазначене рух

відбувається в радіальному напрямку з ультразвуковою частотою і викликає розпад прикордонного шару на поверхні теплообмінника [29].

Робіонік Х. Д. пропонує інтенсифікувати теплообмін встановлюючи ультразвуковий випромінювач всередині теплообмінника [30].

На рисунку 1.10 представлена схема поверхневого теплообмінного апарату змієвикового типу, що має ультразвуковий випромінювач 3. Електричні імпульси виробляються в високочастотному генераторі 2. Корпус теплообмінника 1 заповнений середовищем, що нагрівається, і яке подається в об'єм теплообмінника напірним патрубком 5. При протиструмній схемі підключення гріючий теплоносій подається в змійовик 6 через напірний патрубок 7 і відводиться через патрубок 4. Нагріте середовище відводить через патрубок 8 на технічні потреби.



1 – корпус теплообмінника; 2 – високочастотний генератор; 3 – ультразвуковий випромінювач; 4 – вихідний патрубок; 5 – напірний патрубок; 6 – змійовик; 7 – напірний патрубок; 8 – патрубок.

Рисунок 1.10 – Схема теплообмінного апарату з ультразвуковим випромінювачем

Ультразвук дозволить скоротити товщину ламінарного пристінного шару або повністю виключити його виникнення. Крім того високочастотні коливання середовища, що нагрівається, перешкоджають виникненню з'єднань кальцію на поверхні теплообміну

Розміщення випромінювачів високочастотних коливань, а також їх потужності визначається продуктивністю теплообмінних апаратів, параметрами теплоносія і геометрією проточних частин. Варто відзначити, що найбільший ефект очікується при рівномірному ультразвуковому впливі як на гріюче, так і на середовище, що нагрівається.

Характер впливу ультразвуку і спосіб впливу дозволяють використовувати запропонований принцип також для підвищення ефективності роботи електронагрівачів [31].

Монотом був проведений експеримент з однією трубкою [32]. Було порівняно час охолодження води, що знаходилася в невеличкій посудині, при використанні високочастотного ультразвуку та без нього. Охолодження забезпечується протіканням холодної води в мідних котушках (див. рис. 1.11).

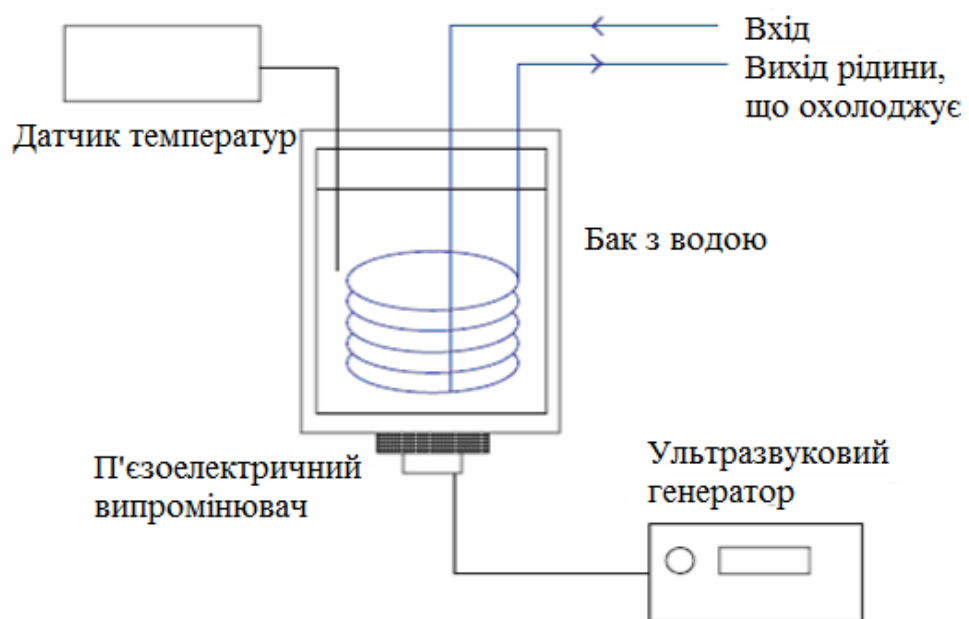


Рисунок 1.11 – Ультразвукове охолодження баку з водою

Конвективний коефіцієнт теплопередачі збільшився від 135 до 204 % при використанні ультразвуку. Це покращення пояснюється двома комбінованими ефектами – локальним перемішування (акустична кавітація) і рухом рідини (акустична течія) [7].

Вплив ультразвуку на теплообмін в кожухотрубному теплообміннику дослідив Гондрексон [33].

Кожухотрубний теплообмінник представляє собою трубу, всередині якої знаходиться U-подібна труба (див. рис. 1.12). Більша трубка поєднана з п'єзоелектричним випромінювачем, що має частоту 35 кГц, розташований в її центрі і змушує трубу вібрувати.

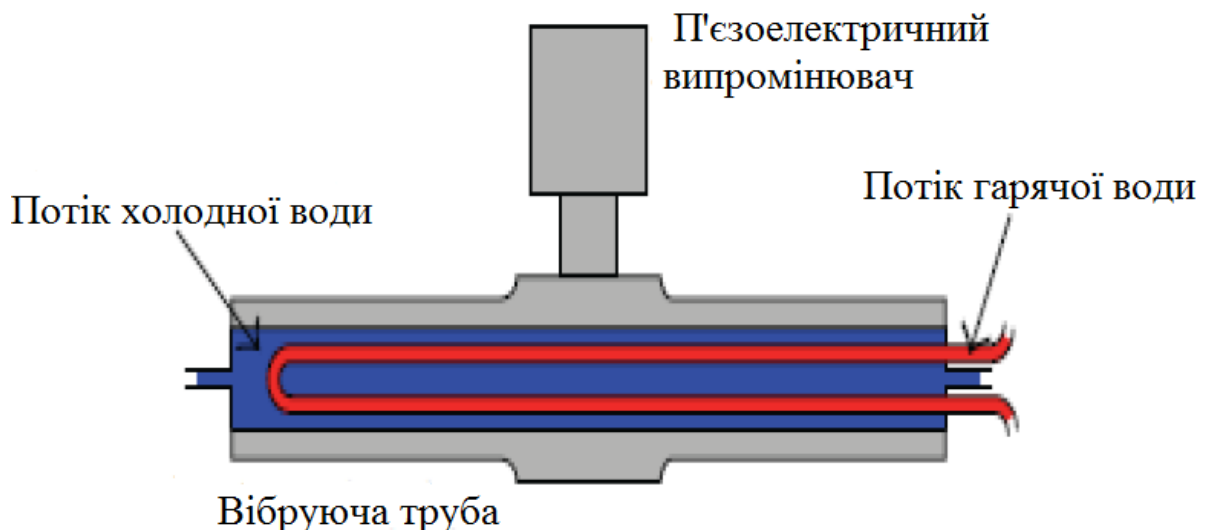


Рисунок 1.12 – Принципова схема вібруючого кожухотрубного теплообмінника з U-подібною трубкою всередині

В ході експерименту було знайдено співвідношення між коефіцієнтом теплопередачі при використанні ультразвуку і без використання ультразвуку, а саме збільшення коефіцієнта теплопередачі, для кожухотрубного теплообмінника з U-подібною трубкою всередині і воно знаходиться в межах від 1,2 до 2,6 в залежності від рідини, швидкості потоку. Це показано на рисунку 1.13.

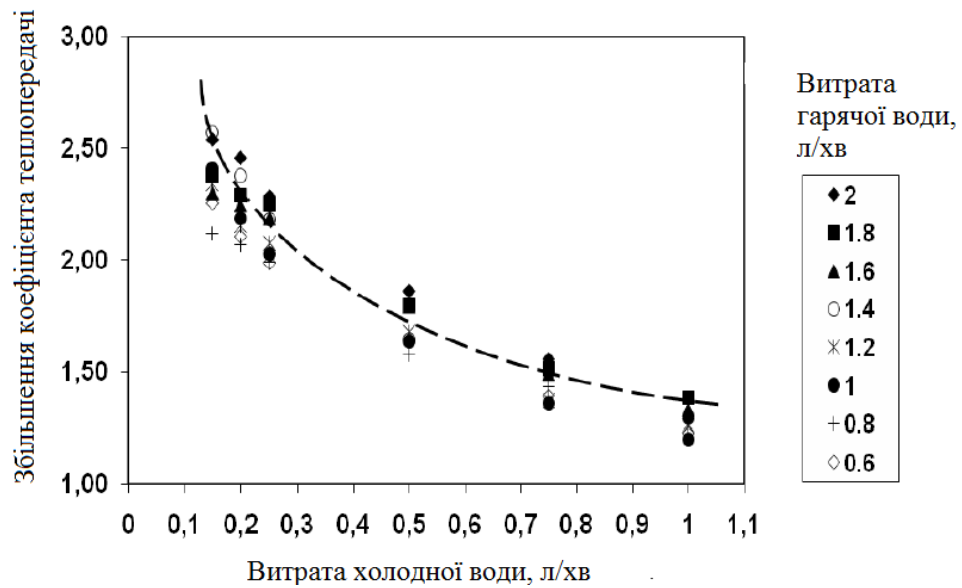


Рисунок 1.13 – Підвищення коефіцієнта теплопередачі в залежності гідродинамічних умов

Ще одна експериментальна робота була проведена Яо [34] з тим же типом теплообмінника (кожухотрубний з внутрішньою U-подібною трубки). Гаряча вода тече всередині внутрішньої труби (див. рис. 1.14). Ультразвук випромінюється на частоті 21 кГц. Як показано на рисунку 1.15, коефіцієнт теплопередачі збільшується в присутності ультразвуку. Однак це посилення набагато менше, ніж спостерігав Гондрексон.

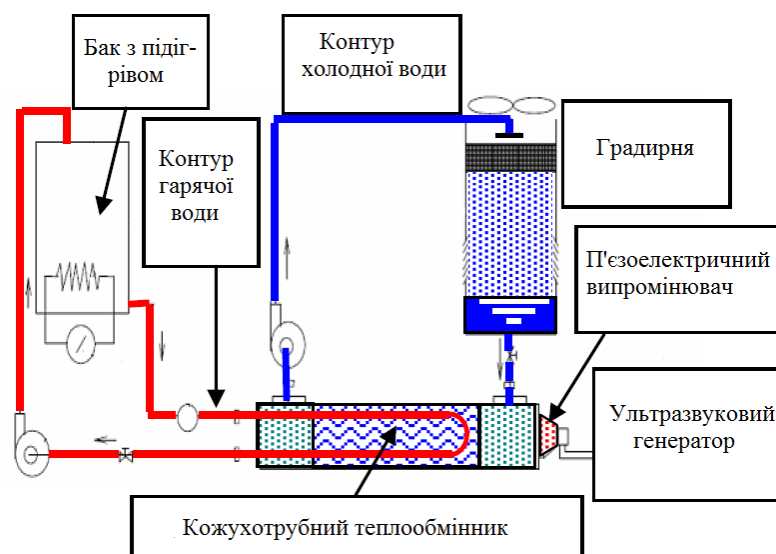


Рисунок 1.14 – Принципова схема експериментальної установки

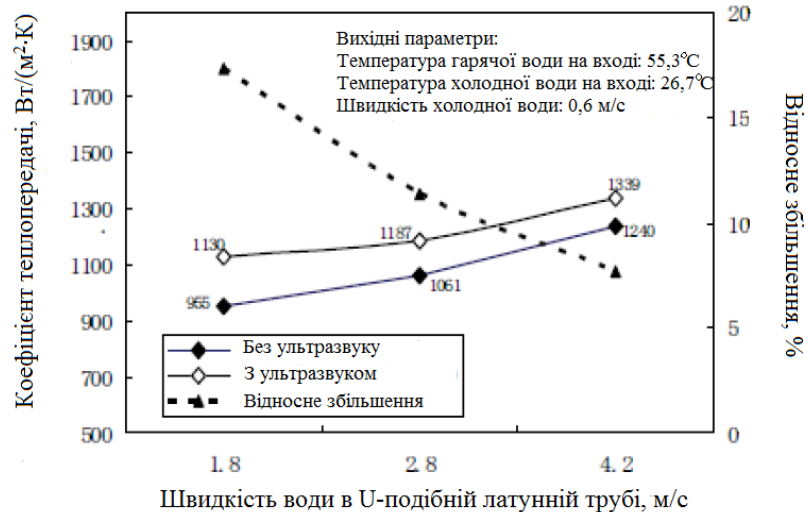


Рисунок 1.15 – Коефіцієнти теплопередачі з і без використання ультразвуку

Це можна пояснити декількома відмінностями між двома експериментами. Перша відмінність полягає в генерації вібрації. У експерименті Гондрексон, геометрія зовнішньої трубки адаптована до ультразвукового генератора, який розташований в середині трубки. Це резонуюча система. У експерименті Яо, генератор розміщений на бічній стороні корпусу, тобто не вся система резонує. Другою відмінністю є швидкість рідини в трубці. У експерименті Гондрексона швидкість близько 5-10 разів нижче, ніж в експерименті Яо. Тобто в першому експерименті режим течії ламінарний, і є більша можливість підвищення коефіцієнту теплопередачі.

Легай та ін. дослідили вплив ультразвуку на теплообмін в теплообміннику типу «труба в трубці», який представляє собою дві прямі труби різного діаметра вставленого одна в іншу.

Труба більшого діаметра з'єднана з ультразвуковим випромінювачем, який знаходиться в її центрі, що змушує трубу вібрувати з частотою 35 кГц. Цей випромінювач і частота обрані спеціально для того, щоб змусити труби резонуючи вібрувати.

По внутрішній трубці тече гаряча вода, а по зовнішній – холодна.

Експериментальна установка Легая представлена на рисунку 1.16.

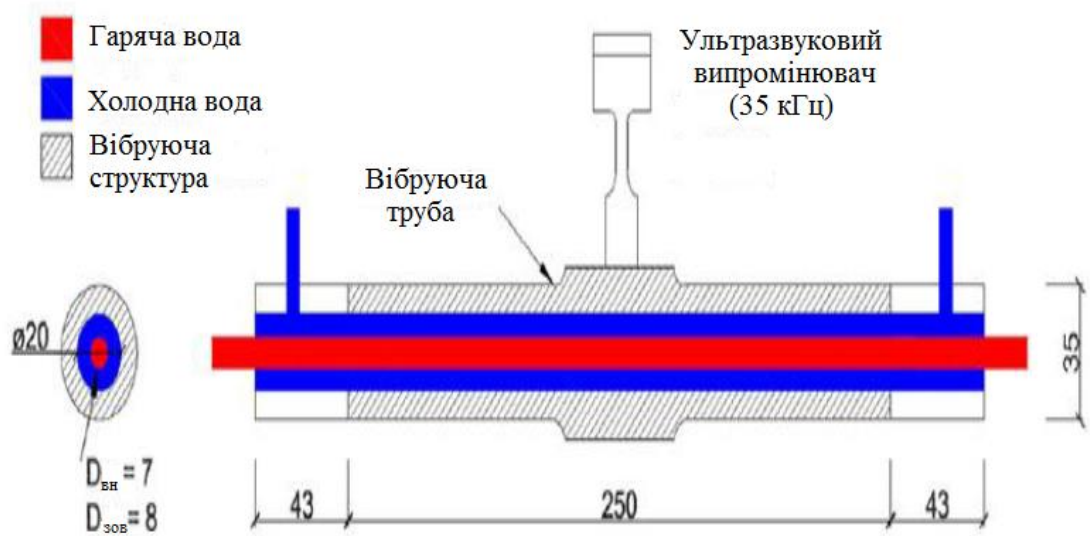


Рисунок 1.16 – Експериментальна установка Легая по дослідженню впливу ультразвуку на теплообмін

На вході та на виході з труб вимірюється температура та швидкість потоку, що дозволить визначити коефіцієнт теплопередачі як для випадку паралельних потоків, так і зустрічних потоків (див. рис. 1.17).

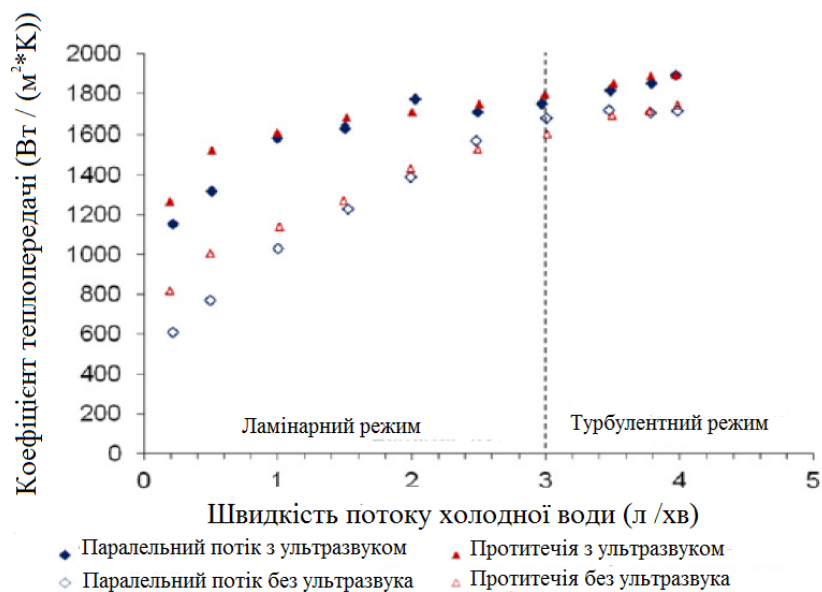


Рисунок 1.17 – Коефіцієнт теплопередачі в залежності від швидкості потоку холодної води

Експериментальні результати показали, що теплопередача покращена на 150 % при ламінарному режимі течії в зовнішній трубі. При турбулентному режимі ніякого покращення немає [35].

Отже, експерименти Моннета, Гондрексон, Яо і Легая підтвердили, що за допомогою ультразвуку можна інтенсифікувати процес теплообміну при ламінарному режимі течії, а при турбулентній течії покращення немає.

Для того щоб перевірити чи справді ультразвук впливає на теплообмін проведемо власні досліді.

1.4 Висновки до першого розділу

Таким чином, ультразвук являє собою механічні коливання пружного середовища, що займають область вище 20000 Гц. Верхня межа спектра ультразвукових коливань не встановлена.

Основні характеристики ультразвуку – це частота, довжина і швидкість хвилі.

Коли ультразвук впливає на рідину, в ній виникають наступні явища: нагрівання за рахунок розсіяння акустичної енергії; акустична кавітація; акустичні течії; акустичне джерело і розпилення. Для інтенсифікації теплообміну найбільш важливими є акустична кавітація і акустичні течії.

Кавітація – це поява маленьких бульбашок заповнених паром і газом під дією розтягуючи зусиль в області розрідження хвилі. Кавітаційна бульбашка має декілька етапів життя: формування, ріст і захлопування. Під час захлопування виникає ударна хвиля високого тиску, що руйнує пограничний підшар і тим самим покращує теплообмін.

Акустична течія – це стаціонарні вихрові потоки рідини або газу, що виникають у вільному неоднорідному звуковому полі, а також поблизу перешкод і тіл, що коливаються, поміщених в звукове поле. Розрізняють течії трьох типів:

а) шліхтингова течія – течії, що виникають в в'язкому приграничному шарі поблизу перешкод, і мікротечії біля бульбашок, що коливаються;

б) релеєвська течія – течії поза прикордонним шаром;

в) еккартовська течія – макротечії в вільному неоднорідному звуковому полі, в якому масштаб неоднорідності значно більше довжини хвилі.

Потоки, що виникають в прикордонному шарі, зменшують його товщину і прискорюють процес теплообміну.

Ультразвукові перетворювачі – це пристрої, що перетворюють електричну енергію в механічну (випромінювачі), або навпаки, механічну енергію в електричну (приймачі).

Їх можна поділити на дві групи: механічні і електромеханічні. Механічні в свою чергу поділяються на аеродинамічні і гідродинамічні.

Найбільший інтерес для нас представляють магнітострикційні і п'єзоелектричні випромінювачі, оскільки вони генерують ультразвук високої частоти.

Було розглянуто експерименти Моннета, Гондрексон, Яо і Легая по дослідженню впливу ультразвуку на теплообмін. Вони підтвердили, що за допомогою ультразвуку можна інтенсифікувати процес теплообміну при ламінарному режимі течії, а при турбулентній течії покращення немає.

2 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ УЛЬТРАЗВУКУ НА ТЕПЛООБМІН

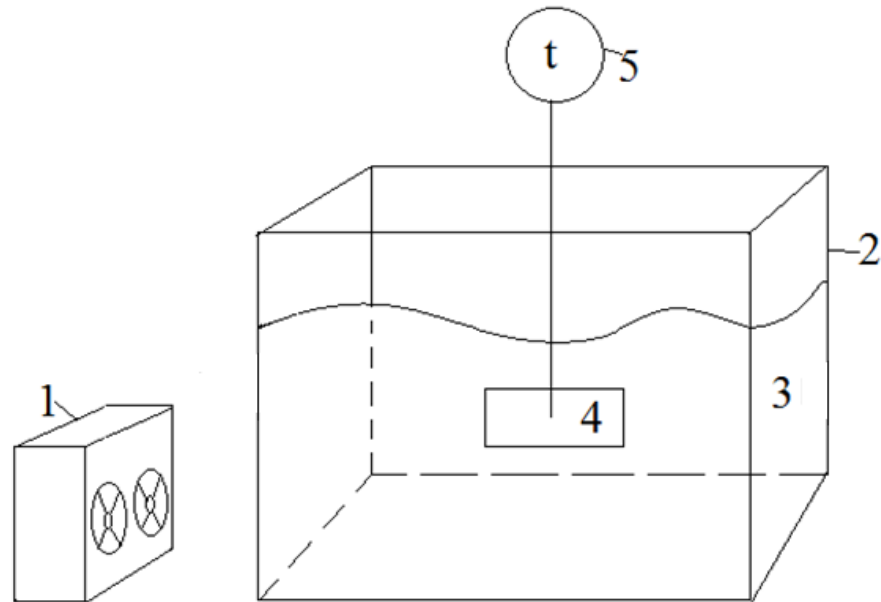
2.1 Опис експерименту

Проведемо експеримент по дослідженню впливу ультразвуку на охолодження розігрітої пластини в масляному середовищі.

Метою даного експерименту є дослідити як ультразвук впливає на швидкість охолодження розігрітої пластини в масляному середовищі.

На даний момент опромінення активної частини трансформатора ультразвуковими хвилями є потенційно цікавим в області охолодження трансформаторів. Використання ультразвуку викликано необхідністю зменшити товщину прикордонного шару, який чинить додатковий термічний опір тепловому потоку, який спрямований від нагрітої міді котушок, через трансформаторний картон, в охолоджуючу середу – трансформаторне масло. У разі, коли розмір горизонтального каналу між котушками становить менше 3 мм, то прикордонний ламінарний шар буде займати всю площу цього каналу, так як товщина ламінарного шару трансформаторного масла буде складати 1 - 1,5 мм. Отже, руйнування цього ламінарного шару може вважатися одним із пріоритетних напрямків досліджень теплових і гідравлічних процесів, які мають місце в обмотках трансформатора. Як альтернатива, застосовна в теплообмінниках, можуть бути використання ребрення поверхонь теплообміну або використання матеріалів з шорсткою поверхнею. Однак, на відміну від теплообмінників, перераховані зміни конструкцій неприйнятні в трансформаторі, в зв'язку з функціональним навантаженням останніх. Отже, єдино прийнятним способом руйнування ламінарного шару, і, відповідно, спрощення процесу охолодження активної частини трансформатора, є використання ультразвуку [36]. Саме тому важливо підтвердити, що ультразвук сприяє охолодженню пластини в масляному середовищі.

На рисунку 2.1 представлена схема експериментальної установки для дослідження вплив ультразвуку на охолодження розігрітої пластини в масляному середовищі.



1 – ультразвуковий випромінювач; 2 – бак; 3 – трансформаторне масло;
4 – латунна пластинка; 5 – термопара.

Рисунок 2.1 – Схема експериментальної установки для дослідження впливу ультразвуку на охолодження розігрітої пластини в масляному середовищі

Суть експерименту полягає в наступному: латунну пластинку 4 розігрівають за допомогою сухого спирту. Далі розігріту пластинку занурюють в бак 2 з трансформаторним маслом 3 температурою 18 °С. Вимірюємо температуру до якої пластинка охолоне за період часу t . Температуру пластинки t вимірюємо за допомогою термопари 5. Повторюємо експеримент опромінюючи масляне середовище ультразвуком, яке випромінює ультразвуковий випромінювач 1. Повторюємо експеримент декілька разів змінюючи температуру нагріву пластинки від 50 до 150 °С з кроком 50 °С, а час охолодження – від 15 с до 60 с з кроком 15 с.

Фотографія реальної експериментальної установки представлено на рисунку 2.2.



Рисунок 2.2 – Фото реальної експериментальної установки

Для дослідів було використано трансформаторне масло марки Т-1500, характеристики якого представлено в таблиці 2.1 [37].

Таблиця 2.1 – Фізико-хімічні характеристики трансформаторного масла марки Т-1500

Показник	Т-1500
1	2
Кінематична в'язкість при 50 °С, м ² /с	8·10 ⁻⁶
Кінематична в'язкість при - 30 °С, м ² /с	1600·10 ⁻⁶
Кислотне число, мг КОН на 1 г масла, не більше	0,01
Температура спалаху в закритому тиглі, °С, не нижче	135
Температура застигання, °С, не вище	- 45
Натрова проба, оптична щільність, не більше	0,4
Прозорість при 5 °С	Витримує
Колір на колориметрі ЦНТ, одиниці ЦНТ, не більше	1,5
Вміст механічних домішок	Відсутній

Продовження таблиці 2.1

1	2
Вміст водорозчинних кислот і лугів	Відсутній
Стабільність проти окислення, не більше:	
- маса летючих низькомолекулярних кислот, мг КОН на 1 г масла	0,04
- масова частка осаду, %	Відсутній
- кислотне число окисленого масла, мг КОН на 1 г масла	0,2
Тангенс кута діелектричних втрат при 90 °С, %, не більше:	0,5
Щільність при 20 °С, г / см ³ , не більше	0,885

В якості ультразвукового випромінювача використовуємо ультразвуковий електронний відлякувач гризунів та комах VSG-316 DUAL SONIC PEST REPELLER, зовнішній вигляд якого представлено на рисунку 2.3 [38].

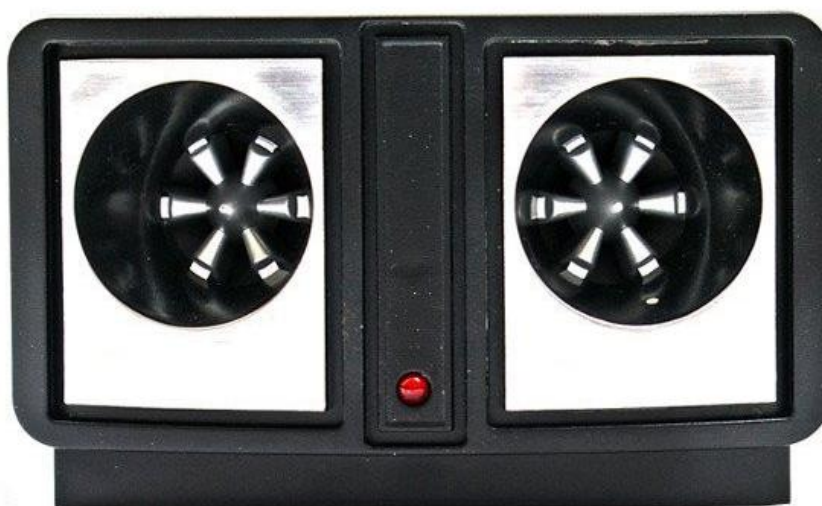


Рисунок 2.3 – Зовнішній вигляд ультразвукового випромінювача VSG-316 DUAL SONIC PEST REPELLER

Пристрій генерує ультразвук за допомогою двох п'єзовипромінювачів. Технічні характеристики апарату представлено в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Технічні характеристики ультразвукового випромінювача VSG-316 DUAL SONIC PEST REPELLER

Параметр	Одиниця виміру	Значення
Номінальна напруга	В	230
Споживання енергії	Вт	2
Діапазон частот	Гц	20000
Інтенсивність ультразвуку	ГВт/м ²	100
Рівень ультразвуку	дБ	100
П'єзовипромінювач	шт.	2
Розміри	мм	140x67x86
Вага	г	170
Ціна	грн	123

В якості приладу для виміру температури використовуємо хромель-алюмінієву термопару (ТХА).

Термопари є активним електричним датчиком температури, придатним для точного вимірювання температур не лише в газових або рідинних середовищах, а й на твердих поверхнях. Завдяки своїй простоті, надійності, стабільності, простоті автоматизації і можливості дистанційного контролю вимірюваної температури вони надзвичайно широко використовуються для контролю і вимірювання температур в лабораторній практиці і в промисловості [39].

Принцип дії термоелектричного термометра базується на виникненні електрорухомої сили (ЕРС) в електричному колі, складеному з різнорідних провідників за нерівності температур у місцях з'єднання провідників, тобто на ефекті Зеєбека [40].

Термопара ТХА здатна вимірювати температуру в діапазоні від -50 до 1000 °С.

Прилад одразу показує температуру в градусах Цельсія, а не ЕРС.

Похибка виміру для термопар цього типу дорівнює $\pm 0,5\%$.

Зовнішній вигляд термопари ТХА представлено на рисунку 2.4.



Рисунок 2.4 – Термопара ТХА

Отже, для того щоб дослідити вплив ультразвуку на теплообмін, проведемо експеримент по опроміненню ультразвуком розігрітої пластини в масляному середовищі.

Метою даного експерименту є дослідити як ультразвук впливає на швидкість охолодження розігрітої пластини в масляному середовищі.

Суть експерименту полягає в наступному: латунну пластинку розігрівають за допомогою сухого спирту. Далі розігріту пластинку занурюють в бак з трансформаторним маслом температурою 18 °С. Вимірюємо температуру до якої пластинка охолоне за період часу t .

Температуру пластинки t вимірюємо за допомогою термопар. Повторюємо експеримент опромінюючи масляне середовище ультразвуком, яке випромінює ультразвуковий випромінювач. Повторюємо експеримент декілька разів змінюючи температуру нагріву пластинки від 50 до 150 °C з кроком 50 °C, а час охолодження – від 15 с до 60 с з кроком 15 с.

Для дослідів було використано трансформаторне масло марки Т-1500.

В якості ультразвукового випромінювача використовуємо ультразвуковий електронний відлякувач гризунів та комах VSG-316 DUAL SONIC PEST REPELLER.

В якості приладу для виміру температури використовуємо хромель-алюмінієву термопару.

Тепер варто проаналізувати отримані результати експерименту.

2.2 Результати експерименту

Після проведення експерименту, його результати було оброблено за допомогою Microsoft Excel.

В таблиці 2.3 представлено результати експерименту за період часу охолодження 15 с.

Таблиця 2.3 – Результати дослідів за період часу 15 с

Температура нагріву пластини, °C	Температура пластини після охолодження (без ультразвуку), °C	Температура пластини після охолодження (з ультразвуком), °C
50	26	23
75	27	25
100	29	27
125	31	29
150	34	31

Для наочності результати експерименту за період часу 15 с представимо графічно на рисунку 2.5.

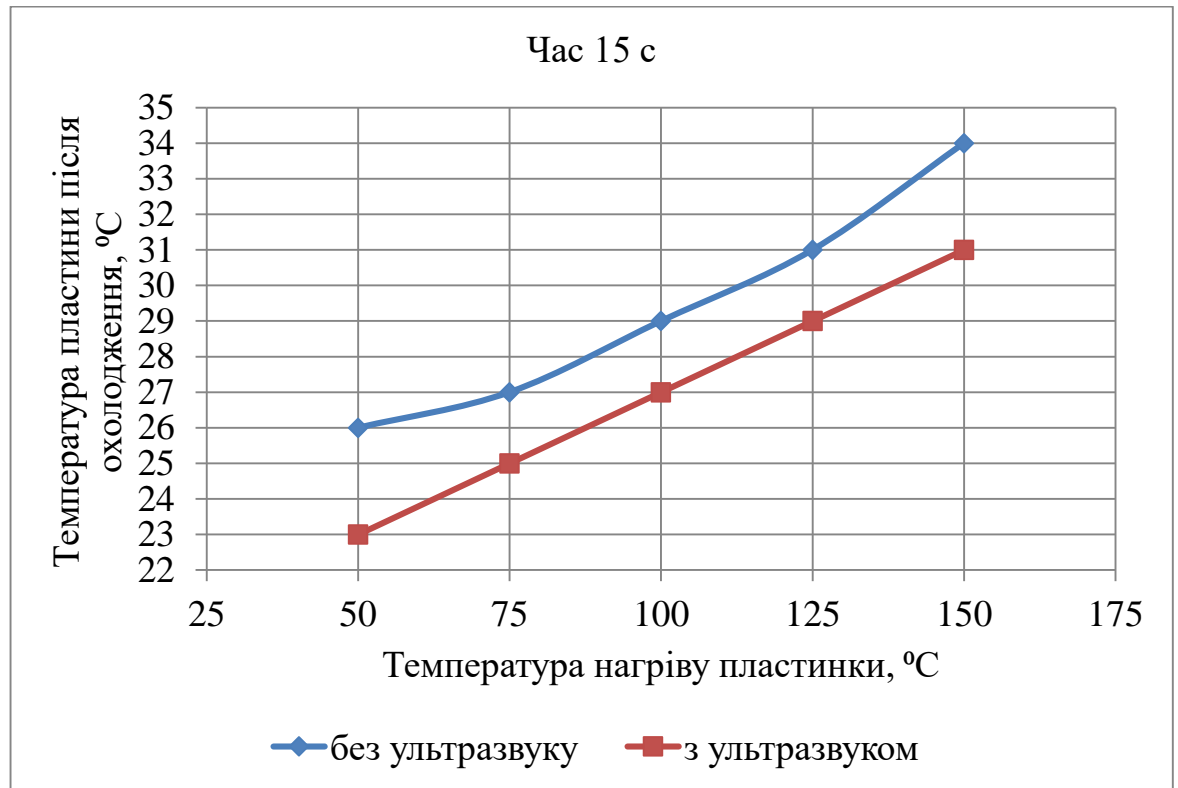


Рисунок 2.5 – Графік залежності температури охолодження пластини від температури нагріву пластинки за період часу 15 с

В таблиці 2.4 представлено результати експерименту за період часу охолодження 30 с.

Таблиця 2.4 – Результати дослідів за період часу 30 с

Температура нагріву пластини, °C	Температура пластини після охолодження (без ультразвуку), °C	Температура пластини після охолодження (з ультразвуком), °C
50	22	21
75	25	23
100	26	25
125	30	27
150	32	30

Для наочності результати експерименту за період часу 30 с представимо графічно на рисунку 2.6.

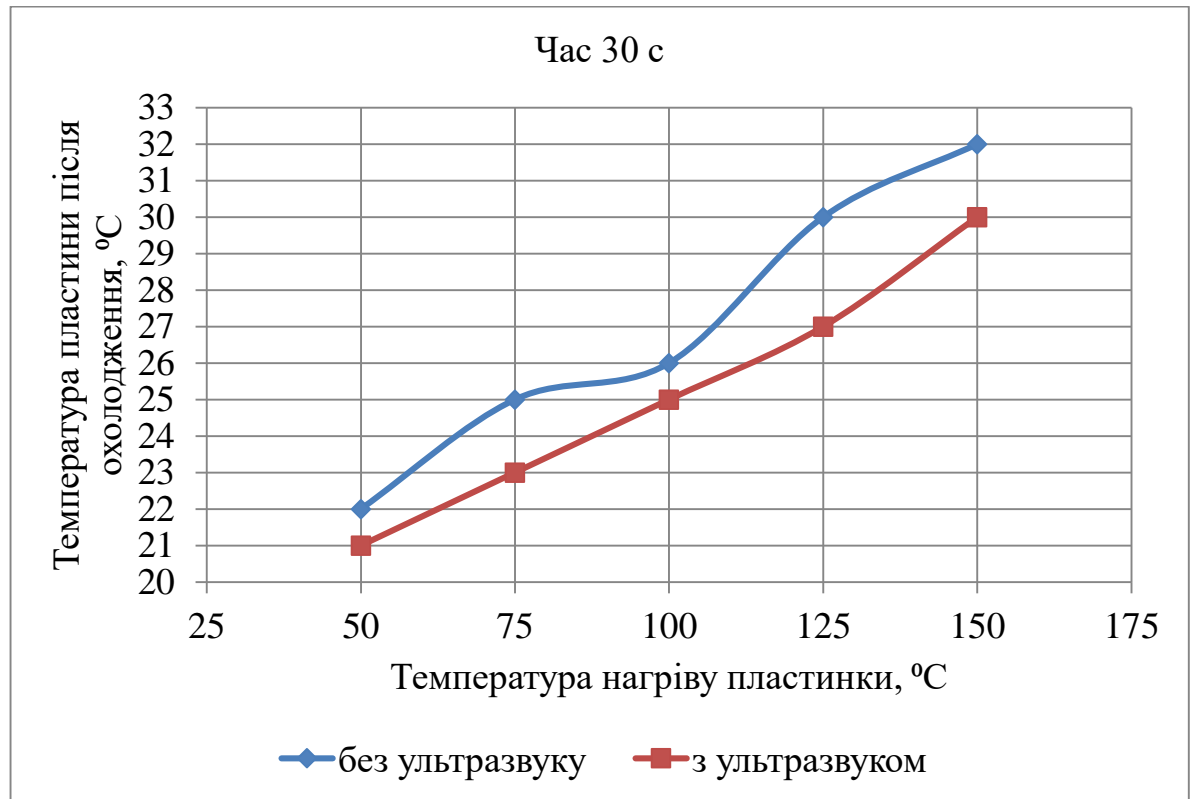


Рисунок 2.6 – Графік залежності температури охолодження пластини від температури нагріву пластинки за період часу 30 с

В таблиці 2.5 представлено результати експерименту за період часу охолодження 45 с.

Таблиця 2.5 – Результати дослідів за період часу 45 с

Температура нагріву пластини, °C	Температура пластини після охолодження (без ультразвуку), °C	Температура пластини після охолодження (з ультразвуком), °C
50	22	21
75	24	21
100	24	22
125	27	24
150	29	25

Для наочності результати експерименту за період часу 45 с представимо графічно на рисунку 2.7.

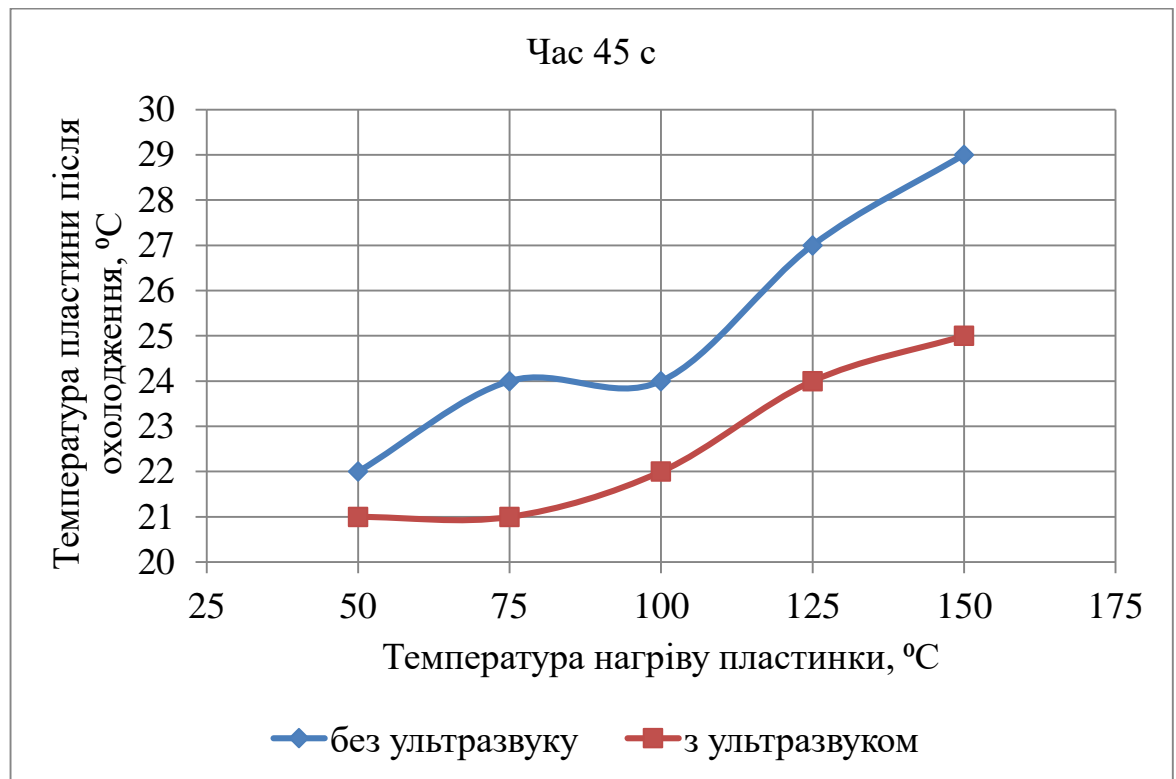


Рисунок 2.7 – Графік залежності температури охолодження пластини від температури нагріву пластинки за період часу 45 с

В таблиці 2.6 представлено результати експерименту за період часу охолодження 60 с.

Таблиця 2.6 – Результати дослідження за період часу 60 с

Температура нагріву пластини, °C	Температура пластини після охолодження (без ультразвуку), °C	Температура пластини після охолодження (з ультразвуком), °C
50	20	20
75	21	20
100	22	21
125	23	21
150	24	22

Для наочності результати експерименту за період часу 60 с представимо графічно на рисунку 2.8.

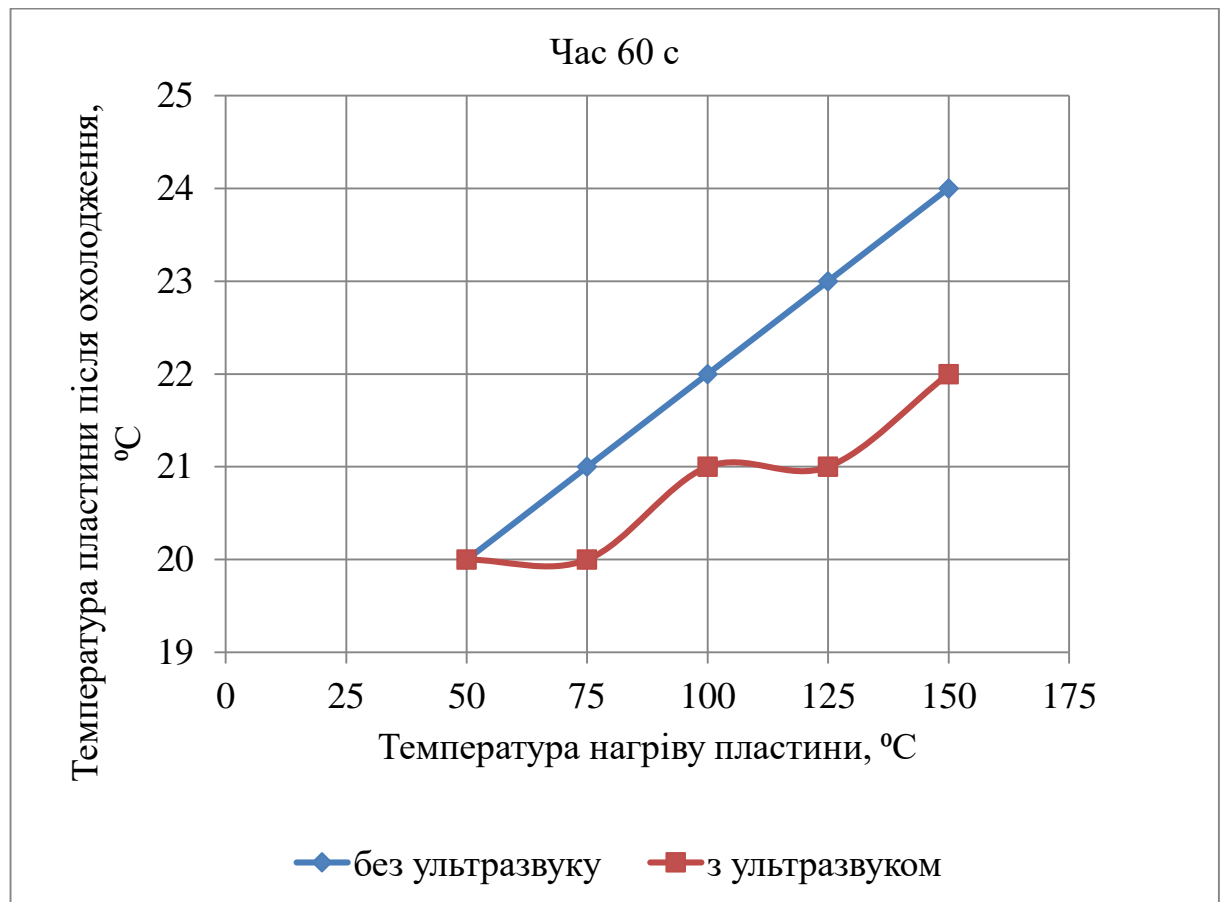


Рисунок 2.8 – Графік залежності температури охолодження пластини від температури нагріву пластини за період часу 60 с

Отже можемо зробити висновок, що при опроміненні масляного середовища ультразвуком температура пластинки після охолодження нижча, ніж без використання ультразвуку, хоча і не значно, що в першу чергу пов'язано з невеликою енергією хвилі ультразвукового перетворювача. Варто відзначити, що при температурі нагріву пластинки вище 100 °C і короткому періоді охолодження пластини різниця стає більш помітною.

Далі необхідно розрахувати темп охолодження і коефіцієнт тепловіддачі.

2.3 Розрахунок темпу охолодження і коефіцієнту тепловіддачі

Дослідимо, як ультразвук впливає на темп охолодження та коефіцієнт тепловіддачі.

Теорію регулярного режиму розробив Г. М. Кондратьєв. Процес охолодження тіла в середовищі з постійною температурою t_c і постійним коефіцієнтом тепловіддачі α можна розділити на три режими:

1) неупорядкований – на процес впливає початковий розподіл температури в тілі;

2) регулярний – в будь-якій точці тіла відносна швидкість зміни температури, яка називається темпом охолодження (нагрівання), залишається постійною і не залежить від часу;

3) стаціонарний – температура у всіх точках тіла дорівнює температурі середовища (теплова рівновага).

У регулярному режимі темп охолодження (нагрівання), m , s^{-1} , який визначається для двох моментів часу τ_1 і τ_2 , визначається за формулою

$$m = \frac{\ln \vartheta_1 - \ln \vartheta_2}{\tau_2 - \tau_1} = \text{const}, \quad (2.1)$$

де $\vartheta_1 = t_1 - t_c$ і $\vartheta_2 = t_2 - t_c$ – надлишкові температури в будь-якій точці тіла в моменти часу τ_1 і τ_2 .

Темп охолодження m залежить від фізичних властивостей тіла, його розмірів і форми, коефіцієнта тепловіддачі і не залежить від часу і координат.

Перша теорема Г.М. Кондратьєва для регулярного режиму виражається формулою

$$m = \psi \cdot \frac{\alpha \cdot F}{\rho \cdot c \cdot V}, \quad (2.2)$$

де ψ – коефіцієнт нерівномірності розподілу температури в тілі, який для термічно тонких тіл дорівнює 1[41];

ρ – густина тіла, кг/м³, що для латуні дорівнює 8400 кг/м³;

c – питома теплоємність тіла, кДж/(м²·К) що для латуні дорівнює 0,38 кДж/(м²·К);

F – площа поверхні тіла, м², що для пластини знаходиться за формулою

$$F = a \cdot b, \quad (2.3)$$

де a – ширина пластини, м, що дорівнює 0,015 м;

b – висота пластини, м, що дорівнює 0,04 м;

V – об'єм тіла, м³, що для пластини знаходиться за формулою

$$V = F \cdot \delta, \quad (2.4)$$

де δ – товщина пластини, м, що дорівнює 0,001 м.

З формули (2.2) можна знайти коефіцієнт тепловіддачі α , Вт/(м²·К), що показано в формулі

$$\alpha = \frac{m \cdot \rho \cdot c \cdot V}{\psi \cdot F}. \quad (2.5)$$

За формулою (2.3) знайдемо площу пластини, м²

$$F = 0,015 \cdot 0,04 = 0,006.$$

За формулою (2.4) знайдемо об'єм пластини, м³

$$V = 0,006 \cdot 0,001 = 0,0000006 = 0,6 \cdot 10^{-6}.$$

За формулою (2.1) розрахуємо m , який визначається для двох моментів часу 1 с і 15 с при температурі нагріву пластини 50 °С і без використання ультразвуку, роблячи припущення, що в першу секунду охолодження температура не змінюється s^{-1}

$$m = \frac{\ln(50-18) - \ln(26-18)}{15-1} = 0,099.$$

За формулою (2.5) знайти коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²·К)

$$\alpha = \frac{0,099 \cdot 8400 \cdot 0,38 \cdot 10^3 \cdot 0,6 \cdot 10^{-6}}{1 \cdot 0,006} = 316,1.$$

Результати розрахунку темпу охолодження і коефіцієнту тепловіддачі для періоду часу 15 с представлено в таблиці 2.7. Результати розрахунку представлено графічно на рисунку 2.9.

Таблиця 2.7 – Результати розрахунку темпу охолодження і коефіцієнту тепловіддачі для періоду часу 15 с

Температура нагріву пластини, °С	Темп охолодження (без ультразвуку), s^{-1}	Темп охолодження (з ультразвуком), s^{-1}	Коефіцієнт тепловіддачі (без ультразвуку), Вт/(м ² ·К)	Коефіцієнт тепловіддачі (з ультразвуком), Вт/(м ² ·К)	±	%
50	0,099	0,133	316,1	423,2	107,2	33,9
75	0,132	0,150	420,8	478,1	57,3	13,6
100	0,143	0,158	458,0	503,8	45,8	10,0
125	0,151	0,162	480,6	518,7	38,1	7,9
150	0,151	0,166	481,1	528,5	47,3	9,8

Як видно з результатів розрахунку, коефіцієнт тепловіддачі при опроміненні масляного середовища ультразвуком вище, ніж без використання ультразвуку. Коефіцієнт тепловіддачі при використанні

ультразвуку найбільше виріс порівняно з коефіцієнт тепловіддачі без використання ультразвуку при початковій температурі нагріву пластини 50 °С – на 33,9 %. При більш високих температурах нагріву пластини різниця між коефіцієнтами тепловіддачі стає меншою. Варто відзначити, що при температурі нагріву пластини 125 °С і вище коефіцієнт тепловіддачі без використання ультразвуку майже не змінюється, тоді як коефіцієнт тепловіддачі при використанні ультразвуку продовжує зростати.

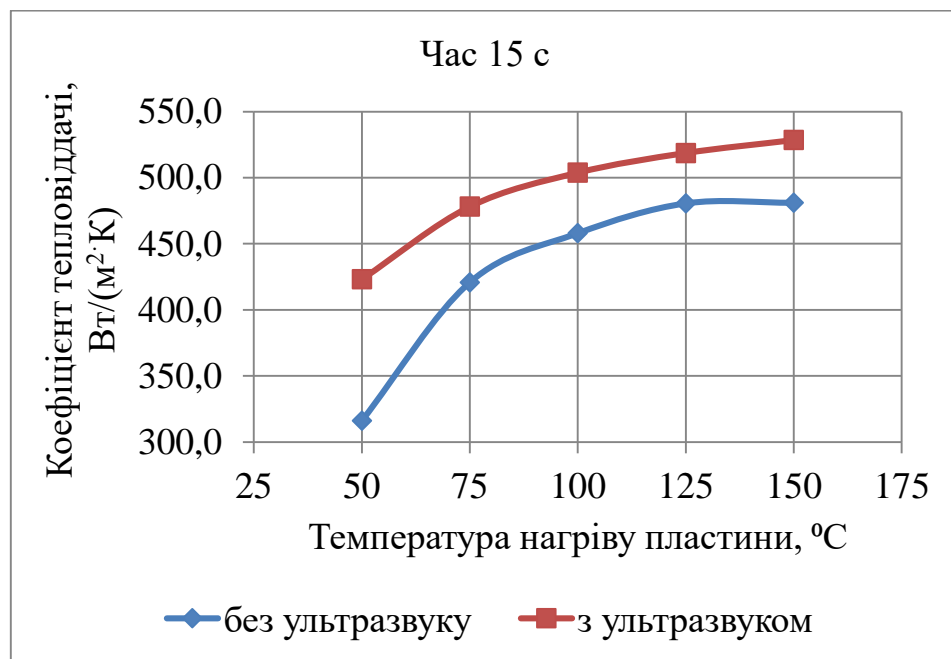


Рисунок 2.9 – Графік залежності коефіцієнту тепловіддачі від температури нагріву пластинки для періоду часу 15 с

Результати розрахунку темпу охолодження і коефіцієнту тепловіддачі для періоду часу 30 с представлено в таблиці 2.8. Результати розрахунку представлено графічно на рисунку 2.10.

Як видно з результатів розрахунку, коефіцієнт тепловіддачі при опроміненні масляного середовища ультразвуком вище, ніж без використання ультразвуку. Коефіцієнт тепловіддачі при використанні ультразвуку найбільше виріс порівняно з коефіцієнт тепловіддачі без використання ультразвуку при початковій температурі нагріву пластини 75 °С – на 16,0 %. Можна спостерігати стрибок коефіцієнта тепловіддачі без

використання ультразвуку при температурі нагріву 100 °С, коли досягає максимуму – 256,2 Вт/(м²·К).

Таблиця 2.8 – Результати розрахунку темпу охолодження і коефіцієнту тепловіддачі для періоду часу 30 с

Температура нагріву пластини, °С	Темп охолодження (без ультразвуку), с ⁻¹	Темп охолодження (з ультразвуком), с ⁻¹	Коефіцієнт тепловіддачі (без ультразвуку), Вт/(м ² ·К)	Коефіцієнт тепловіддачі (з ультразвуком), Вт/(м ² ·К)	±	%
50	0,072	0,082	228,9	260,5	31,7	13,8
75	0,072	0,084	230,8	267,9	37,0	16,0
100	0,080	0,085	256,2	270,9	14,7	5,7
125	0,075	0,085	240,8	272,5	31,7	13,1
150	0,077	0,083	247,0	263,9	17,0	6,9

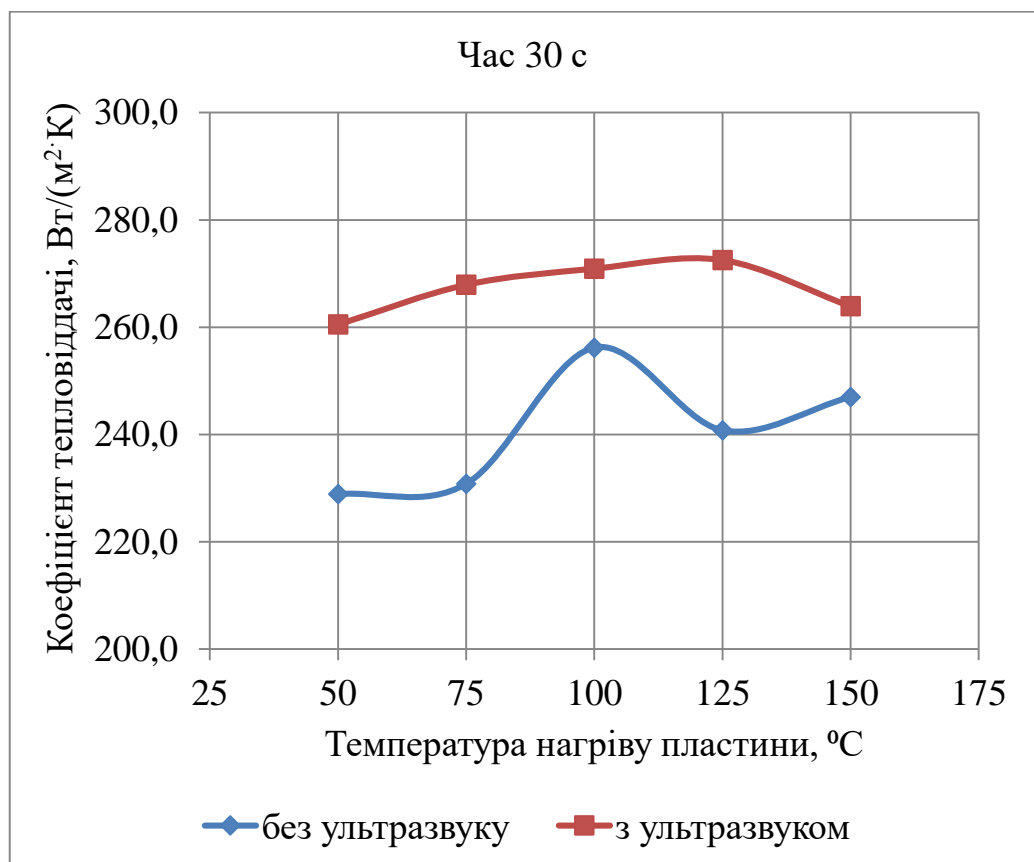


Рисунок 2.10 – Графік залежності коефіцієнту тепловіддачі від температури нагріву пластинки для періоду часу 30 с

Результати розрахунку темпу охолодження і коефіцієнту тепловіддачі для періоду часу 45 с представлено в таблиці 2.9. Результати розрахунку представлено графічно на рисунку 2.11.

Таблиця 2.9 – Результати розрахунку темпу охолодження і коефіцієнту тепловіддачі для періоду часу 45 с

Температура нагріву пластини, °С	Темп охолодження (без ультразвуку), с ⁻¹	Темп охолодження (з ультразвуком), с ⁻¹	Коефіцієнт тепловіддачі (без ультразвуку), Вт/(м ² ·К)	Коефіцієнт тепловіддачі (з ультразвуком), Вт/(м ² ·К)	±	%
50	0,047	0,054	150,9	171,7	20,9	13,8
75	0,051	0,067	163,3	213,6	50,3	30,8
100	0,059	0,069	189,7	219,1	29,4	15,5
125	0,056	0,065	179,6	209,0	29,4	16,4
150	0,056	0,067	180,3	213,1	32,8	18,2

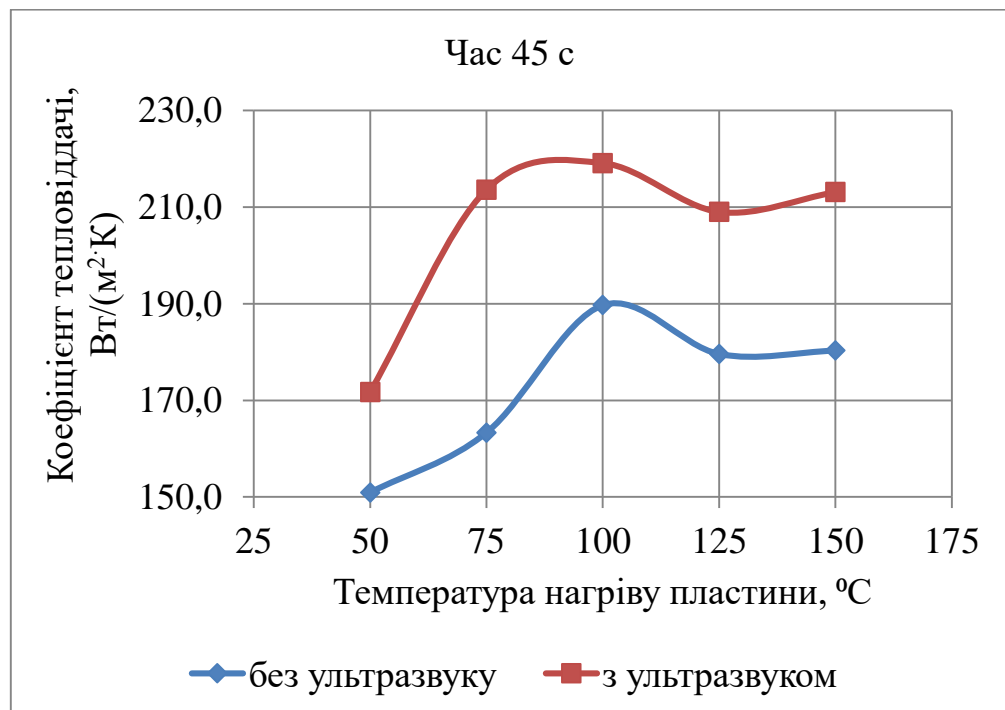


Рисунок 2.11 – Графік залежності коефіцієнту тепловіддачі від температури нагріву пластинки для періоду часу 45 с

Як видно з результатів розрахунку, коефіцієнт тепловіддачі при опроміненні масляного середовища ультразвуком вище, ніж без використання ультразвуку. Коефіцієнт тепловіддачі при використанні ультразвуку найбільше вище порівняно з коефіцієнт тепловіддачі без використання ультразвуку при початковій температурі нагріву пластини 75 °С – на 30,8 %. Варто відзначити, що обидві криві зростають, досягаючи максимуму при температурі нагріву пластини 100 °С, після чого коефіцієнти тепловіддачі зменшуються і знов починають зростати після температури нагріву пластини 125 °С.

Результати розрахунку темпу охолодження і коефіцієнту тепловіддачі для періоду часу 60 с представлено в таблиці 2.10. Результати розрахунку представлено графічно на рисунку 2.12.

Таблиця 2.10 – Результати розрахунку темпу охолодження і коефіцієнту тепловіддачі для періоду часу 60 с

Температура нагріву пластини, °С	Темп охолодження (без ультразвуку), с ⁻¹	Темп охолодження (з ультразвуком), с ⁻¹	Коефіцієнт тепловіддачі (без ультразвуку), Вт/(м ² ·К)	Коефіцієнт тепловіддачі (з ультразвуком), Вт/(м ² ·К)	±	%
50	0,047	0,047	150,0	150,0	0,0	0,0
75	0,050	0,057	159,3	181,2	21,9	13,8
100	0,051	0,056	163,4	179,0	15,6	9,5
125	0,052	0,061	165,7	193,4	27,6	16,7
150	0,052	0,059	167,2	189,2	21,9	13,1

Як видно з результатів розрахунку, коефіцієнт тепловіддачі при опроміненні масляного середовища ультразвуком вище, ніж без використання ультразвуку. Коефіцієнт тепловіддачі при використанні ультразвуку найбільше вище порівняно з коефіцієнт тепловіддачі без використання ультразвуку при початковій температурі нагріву пластини 125

°C – на 16,7 %. Коефіцієнт тепловіддачі при використанні ультразвуку зростає стрибкоподібно, маючи максимуми при температурах нагріву пластини 75 і 125 °C. Коефіцієнт тепловіддачі без використання ультразвуку зростає.

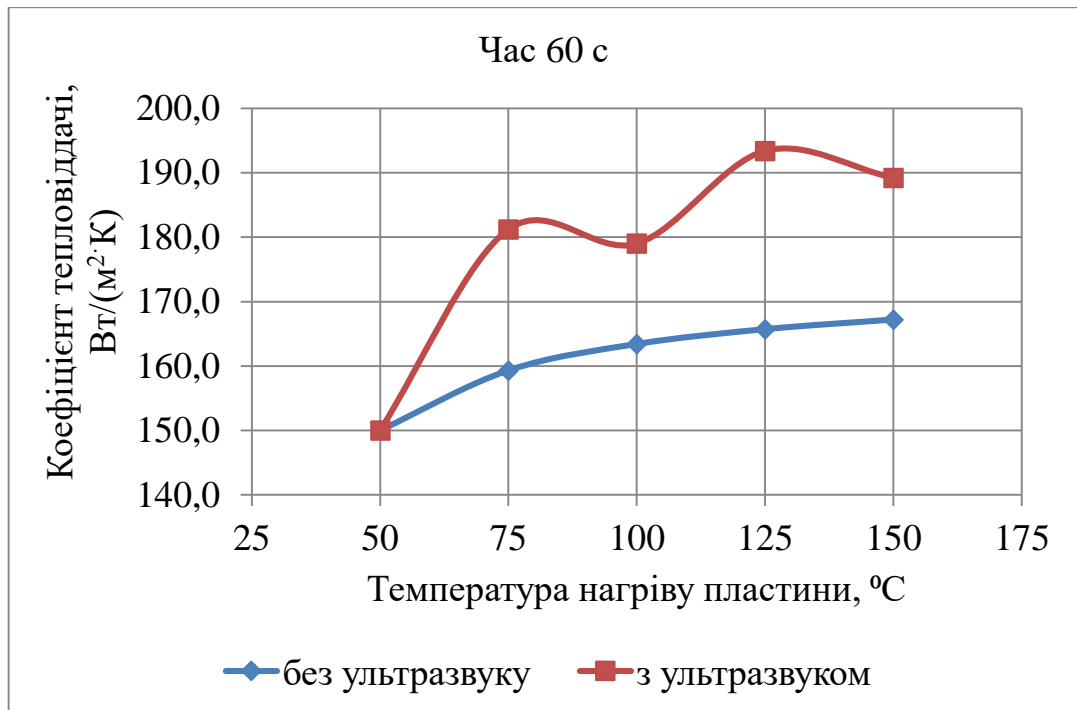


Рисунок 2.12 – Графік залежності коефіцієнту тепловіддачі від температури нагріву пластинки для періоду часу 60 с

Отже, можемо зробити висновок, що найбільший коефіцієнт тепловіддачі при використанні ультразвуку, 528,5 Вт/(м²·К), було досягнуто при температурі нагріву пластини 150 °C і періоді охолодження 15 с. Коефіцієнт тепловіддачі при використанні ультразвуку найбільше виріс порівняно з коефіцієнт тепловіддачі без використання ультразвуку при початковій температурі нагріву пластини 50 °C і періоді охолодження 15 с – на 33,9 %. Тобто найбільш ефективним є використання ультразвуку для охолодження при невисоких температурах нагріву і коротких періодах охолодження.

Найбільший вплив на інтенсифікацію теплообміну має акустична кавітація і акустичні течії. Оскільки ультразвуковий перетворювач, що

використовувався в експерименті не достатньо потужний, то більший інтерес викликає кавітація, тому необхідно розрахувати параметри пов'язані з нею.

2.4 Параметри ультразвукової кавітації

Як вже було сказано в першому розділі, під кавітацією розуміють створення в рідині, при розповсюдженні в ній ультразвуку, що створює від'ємний тиск, бульбашок, які потім швидко захоплюються [42].

Енергія, що витрачається на створення кавітаційних бульбашок в напівперіод розширення, в наступний напівперіод перетворюється в роботу стиснення пароповітряної суміші в бульбашці, яка в кінцевій стадії захоплювання бульбашки виділяється в вигляді енергії ударної хвилі [43].

Період коливань T є величиною оберненою до частоти ультразвуку f і його можна знайти з формулою, с

$$T = \frac{1}{f}. \quad (2.6)$$

З формули (2.6) знайдемо період коливань, с

$$T = \frac{1}{20000} = 5 \cdot 10^{-5}.$$

Отже, зони розрідження і стиснення змінюються кожні $2,5 \cdot 10^{-5}$ с.

Знайдемо швидкість поширення ультразвукових хвиль в трансформаторному маслі за формулою (1.1), м/с:

$$c = \sqrt{\frac{1}{5,82 \cdot 10^{-10} \cdot 880,3}} = 1397,09.$$

Як бачимо, швидкість поширення ультразвукових хвиль в трансформаторному маслі майже така ж висока як для води, і в декілька разів перевищує аналогічне значення для повітря.

З формули (1.2) можемо знайти довжину хвилі λ , м:

$$\lambda = \frac{c}{f}. \quad (2.7)$$

Довжину хвилі ультразвуку знайдемо за формулою (2.7), м

$$\lambda = \frac{1397,09}{20000} = 0,069.$$

Отже, зони розрідження і стиснення змінюються кожні 0,0345 м.

Розрахуємо тиск за формулою (1.3), Па

$$P = \sqrt{880,3 \cdot 1397,09 \cdot 100 \cdot 10^9} = 350,69 \cdot 10^6.$$

Резонансний радіус бульбашки знайдемо за формулою (1.4), м

$$R_p = \sqrt{\frac{3 \cdot 1,4 \cdot 350,69 \cdot 10^6}{880,3 \cdot 20000^2}} = 0,065.$$

Отже, ультразвукова хвиля проходячи через бак з трансформаторним маслом зі швидкістю 1397,09 м/с створює зони стиснення та розрідження, які змінюються кожні $2,5 \cdot 10^{-5}$ с або 0,0345 м. Виникаючий при цьому знакозмінний тиск дорівнює $350,69 \cdot 10^6$ Па. Бульбашки, які з'явилися в трансформаторному маслі, ростуть до тих пір, доки не досягнуть резонансного розміру – 0,065 м.

2.5 Висновки до другого розділу

Для того щоб дослідити вплив ультразвуку на теплообмін, було проведено експеримент по опроміненню ультразвуком розігрітої пластини в масляному середовищі.

Метою даного експерименту було дослідити як ультразвук впливає на швидкість охолодження розігрітої пластини в масляному середовищі.

Суть експерименту полягає в наступному: латунну пластинку розігрівають за допомогою сухого спирту. Далі розігріту пластинку занурюють в бак з трансформаторним маслом температурою 18 °С. Вимірюємо температуру до якої пластинка охолоне за період часу τ . Температуру пластинки t вимірюємо за допомогою термометри. Повторюємо експеримент опромінюючи масляне середовище ультразвуком, яке випромінює ультразвуковий випромінювач. Повторюємо експеримент декілька разів змінюючи температуру нагріву пластинки від 50 до 150 °С з кроком 50 °С, а час охолодження – від 15 с до 60 с з кроком 15 с.

Для дослідів було використано трансформаторне масло марки Т-1500.

В якості ультразвукового випромінювача використовуємо ультразвуковий електронний відлякувач гризунів та комах VSG-316 DUAL SONIC PEST REPELLER.

В якості приладу для виміру температури використовуємо хромель-алюмінієву термометри.

Отримані результати експерименту свідчать про те, що при опроміненні масляного середовища ультразвуком температура пластинки після охолодження нижча, ніж без використання ультразвуку, хоча і не значно, що в першу чергу пов'язано з невеликою енергією хвилі ультразвукового перетворювача. Варто відзначити, що при температурі нагріву пластинки вище 100 °С і короткому періоді охолодження пластини різниця стає більш помітною.

На основі отриманих даних було розраховано темп охолодження і коефіцієнт тепловіддачі.

Найбільший коефіцієнт тепловіддачі при використанні ультразвуку, $528,5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, було досягнуто при температурі нагріву пластини $150 \text{ }^\circ\text{C}$ і періоді охолодження 15 с . Коефіцієнт тепловіддачі при використанні ультразвуку найбільше виріс порівняно з коефіцієнт тепловіддачі без використання ультразвуку при початковій температурі нагріву пластини $50 \text{ }^\circ\text{C}$ періоді охолодження 15 с – на $33,9 \%$. Тобто найбільш ефективним є використання ультразвуку для охолодження при невисоких температурах нагріву і коротких періодах охолодження.

Інтенсифікація теплообміну в експерименті відбулася за рахунок ультразвукової кавітації, оскільки енергії ультразвукового перетворювача не вистачає на створення акустичних течій, було розраховано параметри ультразвукової кавітації:

- швидкість поширення ультразвукових хвиль в трансформаторному маслі $c = 1397,09 \text{ м/с}$;

- напівперіод хвилі $T = 2,5 \cdot 10^{-5} \text{ с}$;

- довжина хвилі $\lambda = 0,069 \text{ м}$;

- тиск $P = 350,69 \cdot 10^6 \text{ Па}$;

- резонансний розмір бульбашки $R_p = 0,065 \text{ м}$.

3 ОХОРОНА ПРАЦІ І ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ

Охорона праці – це система правових, соціально-економічних, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних і лікувально-профілактичних заходів і засобів, спрямованих на збереження життя, здоров'я і працездатності людини у процесі праці [44].

Головне завдання охорони праці – звести до мінімуму імовірність травматизму чи захворювання працюючих та створити оптимальні умови для їх праці, що забезпечують найкраще самопочуття та максимальну працездатність людини [45].

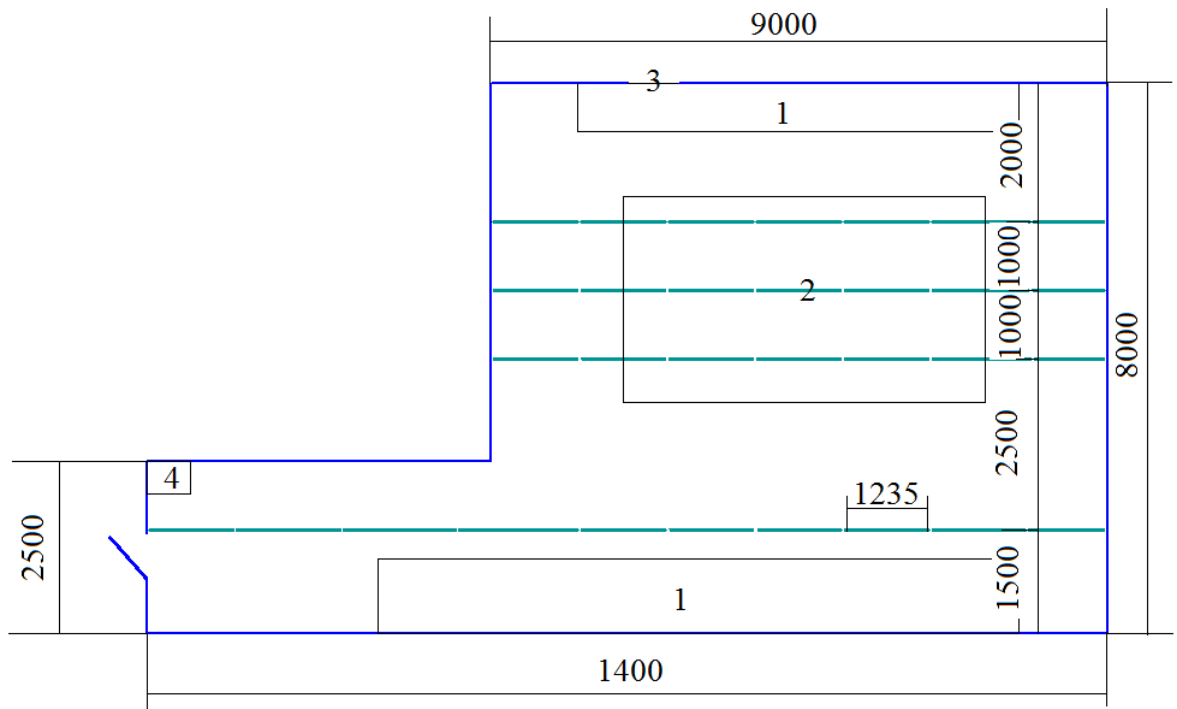
З охороною праці нерозривно пов'язана техніка безпеки, тобто система організаційних заходів і технічних засобів, що запобігає впливу небезпечних виробничих чинників на працюючих [46].

Основою законодавства України з охорони праці є Конституція України, що гарантує громадянам право на безпечні й здорові умови праці й система законодавчих актів України, спрямованих на реалізацію цього конституційного права.

Основними законодавчими актами цієї системи є наступні Закони України: «Про охорону праці», «Про охорону здоров'я», «Про пожежну безпеку», «Про обов'язкове державне соціальне страхування від нещасного випадку на виробництві й професійного захворювання, що привели до втрати працездатності», «Про використання ядерної енергії і радіаційний захист», «Про забезпечення санітарного й епідемічного благополуччя населення», «Про цивільну оборону», Кодекс законів «Про працю України» [47].

В даній дипломній роботі досліди виконуються на експериментальній установці, що складається з ультразвукового випромінювача, колби з трансформаторним маслом, латунної пластини, сухого спирту і термопари, і знаходиться в 1 аудиторії адміністративного корпусу ЗДІА. Установка не впливає на мікроклімат в аудиторії.

Умовний план аудиторії зображено на рисунку 3.1.



1 – зони розташування експериментальних установок; 2 – робоча зона;
3 – вікно; 4 – вогнегасник.

Рисунок 3.1 – Умовний план аудиторії з схематичним зображенням розташування світильників

3.1 Аналіз шкідливих та небезпечних факторів в лабораторії

Шкідливий фактор – це такий чинник, вплив якого за певних умов може призвести до захворювання, зниження працездатності і (або) негативного впливу на здоров'я нащадків [48].

Комплекс шкідливих факторів класифікується за природою дії на організм людини на наступні групи: фізичні, хімічні, біологічні; психофізичні [47].

Лабораторія характеризується наступними шкідливими факторами:

а) Фізичні шкідливі фактори:

- понижена або підвищена температура, вологість і рухливість повітря робочої зони;

- підвищена інтенсивність теплового випромінювання;
- недостатність або відсутність природного освітлення;
- недостатня освітленість робочої зони;
- високий рівень інфразвуку, шуму, ультразвуку та вібрації.

б) Хімічні шкідливі фактори – шкідливі хімічні речовини.

в) Біологічні шкідливі фактори – немає.

г) психофізичні шкідливі виробничі фактори:

- фізичні перевантаження – немає;
- нервово-психічні перевантаження – монотонність праці.

Розглянемо більш детально кожен з факторів.

Показник теплового стану людини – температура її тіла. Дія перегрівання на організм людини може виявлятися у вигляді гострого перегрівання – гіпертермії. Перегрівання проявляються почервонінням шкіри, посиленням потовиділенням, почастишенням пульсу та дихання, підвищенням температури тіла. При сильних ступенях перегрівання перш за все з'являються мозкові явища: мерехтіння в очах, шум у вухах, нудота. Під впливом перегрівання спостерігаються ряд нервових розладів – дратівливість, головний біль, безсоння. Іноді перегрівання може проходити у вигляді судорожної хвороби.

Охолодження призводить до розладу кровообігу, зниження імунобіологічних властивостей організму. Раптовий перехід із теплового приміщення в холодне може призвести до застою крові у слизових дихальних шляхів та полегшити проникнення крізь них мікроорганізмів. Охолодження організму сприяє виникненню захворювань робітників на ревматизм, грип та хвороби дихальних шляхів. У зв'язку з охолодженням може розвинутиися озноблення пальців рук та ніг, що супроводжується відчуттям зуду, печією на припухлих місцях. У робітників, які працюють в умовах охолодження, можуть спостерігатися різноманітні невралгії, міальгії та міозити. [49].

Температура в приміщенні взимку підтримується в межах 15 - 21 °С, влітку – 18 - 23 °С

Вологість дуже впливає на організм людини, на його терморегуляцію. Висока відносна вологість характерна для ряду цехів шкіряного, паперового виробництва, шахт, пралень та ін. Надлишкова вологість (понад 80%) ускладнює випаровування вологи з поверхні шкіри. Це може призвести до погіршення загального стану і зниження працездатності людини. Підвищена вологість повітря (понад 75 - 85%) у сполученні з низькими температурами чинить значний охолоджуючий вплив, а в поєднанні з високими викликає перегрівання організму. Знижена відносна вологість (нижче 18 - 20%) також є несприятливою для людини, оскільки призводить до висихання слизових оболонок і зниження захисної функції верхніх дихальних шляхів [50].

Вологість в лабораторії не перевищує 70 - 75%.

Впливає на людину також рухливість повітря. Людина відчуває дію повітря вже при швидкості руху 0,1 м/с. Переміщуючись вздовж шкіри людини, повітря здуває насичений водяною парою шар повітря, що обволікає людину, і тим самим сприяє покращенню самопочуття. При великих швидкостях повітря і низькій його температурі зростають втрати тепла конвекцією, що веде до переохолодження організму людини [48].

Швидкість руху в приміщенні не перевищує 0,1 м/с.

Інфрачервоне випромінення збільшує тепловий вплив на людину. Короткохвильова радіація (0,7-2,4 мкм) викликає підвищення температури тканини, що знаходиться глибоко під шкірою.

Під впливом інфрачервоного випромінювання в організмі людини виникають фізіологічні порушення, утворюються біологічно активні речовини, підсилюється секреторна діяльність шлунку, а в центральній нервовій системі розвиваються гальмувальні процеси, погіршується загальний обмін речовин [46].

Джерел променистого потоку теплоти в приміщенні немає. Опалення – централізоване.

Реальні умови та допустимі норми мікроклімату [51] для лабораторії наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Порівняння параметрів аудиторії з оптимальними значеннями показників мікроклімату

Параметр	Аудиторія	Оптимальні значення	Допустимі значення
Температура в холодну пору року, °С	15 - 21	21 - 23	17 - 25
Температура в теплу пору року, °С	18 - 23	22 - 24	19-30
Відносна вологість в холодну пору року, %	70 - 75	60 - 40	75
Відносна вологість в теплу пору року, %	70 - 75	60 - 40	60 (при 27 °С)
Швидкість переміщення повітря в холодну пору року, м/с	0,1	0,1	0,2
Швидкість переміщення повітря в теплу пору року, м/с	0,1	0,2	0,3

Як видно з таблиці 3.1, загалом мікроклімат в аудиторії відповідає допустимим значенням, хоча температура в приміщенні може бути нижче допустимих значень.

Недостатність природного освітлення пов'язана з недостатніми розмірами віконних проїм, а також наявністю конфронтуючих будинків та споруд. Недостатня освітленість робочої зони може бути спричинена, нераціональним розташуванням світильників та ламп штучного освітлення.

При недостатньому освітленні людина працює менше продуктивно, швидко втомлюється, зростає потенційна небезпека помилкових дій і нещасних випадків. Погане освітлення може призвести до порушення функції зорового аналізатора, розвитку професійних захворювань [52].

Освітлення в приміщенні комбіноване. У світлий час доби природне (бокове) освітлення, що забезпечує 1 вікно, площею 0,29 м², не дозволяє нормально працювати. Тому додатково використовується штучне освітлення. У лабораторії розташовані 25 світильників ЛПО46, довжиною 1235 мм. В

кожному світильнику одна люмінесцентна лампа ЛБ 40-7 зі світловим потоком 2900 Лм і довжиною 1213,6 мм. Коефіцієнт відбиття від стелі – 70 %, від стін – 50 %.

Розрахуємо фактичну освітленість приміщення і порівняємо її з нормативною величиною. Розрахунок виконаємо за допомогою метода коефіцієнта використання, використовуючи ДБН В.2.5-28-2006 [53].

Метод коефіцієнта використання призначений для розрахунку загального рівномірного освітлення горизонтальних поверхонь при відсутності великих затінюючих предметів. При розрахунку цим методом враховується як пряме, так і відбите світло. За допомогою світлового потоку вибирається лампа, потік якої не повинен відрізнятись від розрахункового не більш ніж на - 10% ÷ + 20% [54].

При розрахунку по методу коефіцієнта використання потрібний світловий Φ потік ламп знаходиться за формулою, Лм

$$\Phi = \frac{E \cdot k \cdot S \cdot z}{n \cdot N \cdot \eta}, \quad (3.1)$$

де E – нормативна освітленість, Лк;

k – коефіцієнт запасу;

S – освітлювана площа, м²;

z – коефіцієнт нерівномірності освітлення;

n – кількість ламп у світильнику, шт.;

N – число світильників;

η – коефіцієнт використання світлового потоку.

Нормативна освітленість приміщення $E = 400$ Лк [53].

Коефіцієнт запасу залежить від навколишнього середовища, типу приміщення і кількості чисток світильників у рік. Так як у нас приміщення це аудиторія, то він дорівнює $k = 1,4$.

Площа приміщення (рисунок 3.1) дорівнює, м²

$$S = a \cdot b, \quad (3.2)$$

де a – довжина приміщення, м,

b – ширина приміщення, м.

Отже, площа аудиторії 1 за формулою (3.2) дорівнює, м²

$$S = 9 \cdot 8 + 5 \cdot 2,5 = 84,5.$$

Коефіцієнт нерівномірності z освітлення для люмінесцентних ламп дорівнює 1,1.

Для визначення коефіцієнта використання світлового потоку η знаходиться індекс приміщення i і оцінюються коефіцієнти відбиття поверхонь приміщення. Індекс приміщення знаходиться за формулою

$$i = \frac{a \cdot b}{h \cdot (a + b)}, \quad (3.3)$$

де h – висота підвісу світильника над робочою поверхнею, м, яку знаходять за формулою

$$h = H - h_p - h_c, \quad (3.4)$$

H – висота приміщення, м;

h_p – висота робочої поверхні над підлогою, м;

h_c – відстань світлового центру світильника від стелі, м.

З формули (3.4) знайдемо висоту підвісу світильника над робочою поверхнею, м

$$h = 2,2 - 0,8 - 0 = 1,4.$$

Розрахуємо індекс приміщення за формулою (3.3)

$$i = \frac{9 \cdot 8 + 5 \cdot 2,5}{1,4 \cdot (9 + 8 + 5 + 2,5)} = 2,46.$$

Коефіцієнт використання світлового потоку $\eta=0,73$.

З формули (3.1) можна визначити освітленість, Лк

$$E = \frac{\Phi \cdot N \cdot n \cdot \eta}{S \cdot k \cdot z}. \quad (3.5)$$

За допомогою формули (3.5) визначимо освітленість для аудиторії 1, Лк

$$E = \frac{2800 \cdot 25 \cdot 1 \cdot 0,73}{84,5 \cdot 1,4 \cdot 1,1} = 392,7.$$

Як бачимо, розрахунковий світловий потік менше нормативного, але в межах допустимого.

Шум справляє шкідливу фізіологічну дію на людський організм, зумовлює професійні захворювання. Шкідлива дія шуму на людину виявляється через пошкодження слухового апарату (140 дБ), травми нервової системи (150 дБ).

У людини, яка перебуває протягом 6–8 годин під дією шуму інтенсивністю 90 дБ, настає помірне зниження слуху, яке проходить через годину після припинення його дії. Шум, що перевищує 120 дБ, дуже швидко викликає у людини втому, головний біль, порушує серцевий ритм, змінює кров'яний тиск, погіршує роботу органів дихання, негативно впливає на психіку. Чим вищий рівень шуму, тим згубніше він діє на людину. При великій інтенсивності шум викликає вібрацію в кістках черепа і зубах, в м'яких тканинах носа і гортані [52].

Інфразвук несприятливо впливає на весь організм людини, в т.ч. на органи слуху, знижуючи слухову чутливість на всіх частотах. Інфразвукові коливання сприймаються як фізичне навантаження, в результаті якого

виникає втома, головний біль, запаморочення, порушується діяльність вестибулярного апарату, знижується гострота зору та слуху, порушується периферійний кровообіг, виникає відчуття страху та інше. [48].

Небезпечної величини виробничих шумів, вібрацій та інфразвуку в приміщенні немає.

Під дією ультразвуку в рідких компонентах тканин організму виникає кавітація, тобто утворюється велика кількість розривів у вигляді дрібних бульбашок газу. Коли кавітаційні бульбашки лопаються, розвивається великий тиск, в результаті чого відбуваються механічне руйнування кліток живої тканини і сильне локальне підвищення температури. Під впливом ультразвуку прискорюються хімічні процеси, можна спостерігати явища дисперсії і коагуляції, що може призвести, наприклад, до сліпоті. Вплив на людину ультразвуку малої потужності викликає тепловий ефект [55].

Допустимі рівні звукового тиску для робочих місць ультразвукових установок визначені в державному стандарті ДСН 3.3.6037-99 «Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку» [56]. При середньгеометричній частоті 1/3 октанової смуги і при частоті 20 кГц допустимий рівень звукового тиску 100 дБ. Тобто рівень звукового тиску ультразвукового електронного відлякувача гризунів та комах VSG-316 DUAL SONIC PEST REPELLER знаходиться в межах норми.

Забруднюючі повітря шкідливі речовини при контакті з організмом можуть викликати різні захворювання, професійні і гострі отруєння (у тому числі зі смертельним наслідком). Шкідливі речовини проникають в організм людини головним чином через дихальні шляхи, а також через шкіру і шлунково-кишковий тракт. Ефект токсичної дії різних речовин залежить від кількості речовини, що потрапила в організм, їх фізико-хімічних властивостей, тривалості надходження. Особливе значення має хімізм взаємодії даної речовини з біологічними середовищами (кров'ю, ферментами). Отруйні дії залежать від шляхів надходження і виведення, розподілу в організмі, від статі людини, віку, індивідуальної сприйнятливості

й інших супутніх факторів. Загальний токсичний вплив у залежності від виду речовини може викликати різні дії: нервово-паралітичну (бронхоспазм, ядуха, судома, параліч), загально токсичну (набряк мозку, параліч, судоми), задушливу (токсичний набряк легенів), дратівливу (подразнення слизових оболонок), психотичну (порушення психічної активності, свідомості), шкіряно-резорбтивну (місцеві запалення) [57].

Технологічний процес в лабораторії не супроводжується надходженням у повітря робочої зони шкідливої речовини. Такі роботи як, зварювання, фарбування виробляються фахівцями у позанавчальний час. За нормуванням шкідливих речовин в повітрі, приміщення належить до IV-ї групи (малонебезпечні – концентрація більше 10 мг/м^3 [51]).

Вентиляція в лабораторії відноситься до вентиляції з природним спонуканням і є припливною. Припливне повітря надходить через вентиляційні отвори, розташовані на висоті 3 м від рівня підлоги. Таким чином, лабораторії підтримується не менше ніж чотирикратний повітрообмін.

Монотонність праці може бути спричинена одноманітністю роботи працюючого і призводить до швидкого розвитку втоми в зв'язку з локалізацією м'язових і нервових навантажень, незадоволення роботою і зниження творчої активності працівника. Монотонність викликає також у працівника переоцінку тривалості робочого часу (зміна здається значно довшою), а також підвищує аварійність і травматизм.

Небезпечний фактор – небажане явище, дія якого за певних умов може призвести до травми або іншого раптового погіршення здоров'я працівника (гострого отруєння, гострого захворювання) і навіть раптової смерті [57].

До небезпечних факторів в лабораторії можна віднести відкриті струмопровідні частини обладнання і відкрите полум'я при горінні сухого спирту. Отже можемо зробити висновок, що це приміщення має I ступінь шкідливості.

3.2 Заходи щодо усунення шкідливих і небезпечних факторів

Для запобігання виробничому травматизму і профзахворювань розроблені дві групи основних заходів щодо усунення шкідливих і небезпечних факторів: організаційні та інженерні (конструктивні).

Інженерні та організаційні заходи:

- суворе дотримання технологічних інструкцій та інструкцій техніки безпеки;
- регулярне проведення інструктажів та навчання правилам безпечної експлуатації установок обслуговуючого персоналу і студентів.

Студент може бути допущений до роботи тільки після проходження вступного інструктажу з техніки безпеки, а також інструктажу на робочому місці. Вступний інструктаж для студентів проводить викладач. Проведення інструктажу повинно бути оформлено записом в журналі реєстрації виробничого інструктажу з техніки безпеки.

Для забезпечення нормованих параметрів температури в приміщенні взимку доцільним є використати локальний променево-контактний обігрів і звести кількість учбових годин в даній аудиторії до мінімуму. З метою забезпечення природного освітлення в приміщенні доцільно застосувати необхідні архітектурно-будівельні рішення – положенням світлових отворів (вікон) в стінах.

3.3 Електробезпека

Лабораторія оснащена діючими електроустановками, лабораторними стендами, електричними машинами змінного і постійного струму, до яких підводиться напруга 220 / 380 В. При недбалому поводженні з струмоведучими частинами дані напруги є небезпечними для життя.

Лабораторні роботи дозволяється виконувати тільки під наглядом викладача.

До робіт в лабораторії допускаються студенти, які пройшли інструктаж з техніки безпеки при роботі в даній лабораторії і знають:

- правила з техніки безпеки при виконанні лабораторних робіт;
- правила звільнення потерпілого від електричного струму;
- заходи надання першої допомоги потерпілому від електричного струму.

Інструктаж з техніки безпеки проводиться викладачем один раз на семестр на робочому місці до початку лабораторних робіт, проведення інструктажу реєструється. Всі підключення на головному щиті проводиться тільки персоналом кафедри. Студентам забороняється проводити будь-які перемикання, за винятком тих, які передбачені лабораторною роботою.

Включення схеми під напругою після складання і перевірки проводиться в присутності викладача після його дозволу.

Перед перемиканням елементів або розробкою схеми вона повинна бути відключена від джерела живлення. Повторне включення схеми після перемикання проводиться так само, як після збирання.

Приєднання і від'єднання приладів, які спричиняють розрив ланцюга, виробляються при повністю знятій напрузі.

Забороняється розмикати електричні ланцюги в котушках, що мають велику кількість витків і знаходяться в робочому стані, оскільки при цьому виникають значні ЕРС, небезпечні для ізоляції обмоток.

Перед складанням схеми потрібно зовнішнім оглядом перевірити стан ізоляції проводів. У всіх випадках несправності електрообладнання, відключити схему і повідомити про це викладачеві або завідувачу лабораторії.

Забороняється торкатися оголених струмоведучих частин схеми (затискачів, вимірювальних приладів), що знаходяться під напругою.

Люди, які безпосередньо працюють з обладнанням, проходять інструктаж з електробезпеки. Для приводів електрообладнання використовується змінний струм 380 або 220 В, частотою 50 Гц.

Згідно [58] безпечним для людини є перемінний струм 0,01 А, смертельний – 0,1 А.

Проходячи через живі тканини людини, електричний струм чинить термічні (опіки), електролітичні (електроліз) і біологічний вплив. Розрізняють також механічні пошкодження від дії електричного струму. Це призводить до різних порушень в організмі, викликаючи як місцеве ураження тканин і органів (електротравми), так і загальне ураження організму (електричний удар).

Установка повинна бути заземлена, теплоізольована, зроблено занулення, закриті рухомі деталі стенду, виконана ізоляція всіх струмоведучих частин.

3.4 Пожежна безпека

Будинок, в якому знаходиться лабораторія, по вибуховій і пожежній небезпеці відноситься до приміщення категорії Д, оскільки в лабораторії є горючі (книги, документи, меблі, електропроводка) і важкоспалимі речі, які при взаємодії з вогнем можуть горіти без вибуху [59].

За конструктивними характеристиками будівля відноситься до будівель з несучими та огорожувальними конструкціями з бетону і залізобетону, де для перекриттів використовується плиткові матеріалами захищені штукатуркою. Отже, ступінь вогнестійкості будівлі відноситься до третьої (Ш) групи [59].

Причинами виникнення пожежі в лабораторії можуть бути:

- несправності електропроводки, розеток і вимикачів, які можуть призвести до короткого замикання або пробоя ізоляції,
- використання пошкоджених (несправних) електроприладів,
- необережне поводження з вогнем та недотримання заходів пожежної безпеки.

Отже вірогідні пожежі, які можуть бути в лабораторії відносяться до «Е». Клас «Е» пов'язаний з горінням електрообладнання.

Так як лабораторія обладнана електричними установками, то такий засіб пожежогасіння, як вода, не підходить в даному випадку. Основним засобом пожежогасіння електроустановок, що знаходяться під напругою є порошкові вогнегасники. У цій лабораторії використовується порошковий вогнегасник серії ВП-5-02. Цей вогнегасник призначений для гасіння різних речовин (крім здатних горіти без доступу повітря), а також електроустановок напругою до 1,0 кВ.

При вході в лабораторію розташований в доступному для погляду місці детальний план евакуації при надзвичайних ситуаціях, місце розташування пожежного інвентарю та пожежних гідрантів, телефонів та інших засобів зв'язку за допомогою яких можна зв'язатися з пожежною охороною.

Необхідними заходами для запобігання пожеж є своєчасний ремонт електроприладів, використання тільки справних електроприладів, відключення в кінці робочого дня з електромережі електрообладнання, проходження протипожежного інструктажу, на якому студенти ознайомлюються з правилами протипожежної безпеки, призначення осіб відповідальних за пожежну безпеку.

3.5 Висновки до третього розділу

У даному розділі дипломної роботи було розглянуто зроблено аналіз шкідливих та небезпечних виробничих факторів у аудиторії 1, де проводився експеримент (описання і класифікація потенційно шкідливих та небезпечних факторів, визначення можливих причин виникнення цих факторів і короткий опис їх дії на організм людини).

Аналіз показав, що температура в приміщенні взимку може бути нижче допустимої. Для поліпшення умов праці доцільно використати локальний променево-контактний обігрів і звести кількість учбових годин в даній

аудиторії до мінімуму. Природне освітлення в приміщенні недостатнє, тому необхідним є створення ще декількох вікон. Розрахунок штучного освітлення показав, що освітленість в приміщенні нижче необхідного значення, але в межах допустимого.

До небезпечних факторів в лабораторії можна віднести відкриті струмопровідні частини обладнання і відкрите полум'я при горінні сухого спирту.

Це приміщення має I ступінь шкідливості.

Було розглянуто заходи з забезпечення електро- і пожежобезпеки в аудиторії.

ВИСНОВКИ

Теплообмінні апарати різних типів і призначення широко застосовуються в багатьох технологічних процесах. Інтенсивність теплопередачі в теплообмінниках є ключовим показником, який визначає їх масогабаритні характеристики. Саме тому, важливим є питання інтенсифікації теплообміну. Використання ультразвуку є одним із способів вирішення цього питання.

Коли ультразвук впливає на рідину, в ній виникають наступні явища: нагрівання за рахунок розсіяння акустичної енергії; акустична кавітація; акустичні течії; акустичне джерело і розпилення. Для інтенсифікації теплообміну найбільш важливими є акустична кавітація і акустичні течії.

В ході дипломної роботи ознайомилися з сучасними пристроями інтенсифікації технологічних процесів – ультразвуковими перетворювачами. На підставі зробленого дослідження можна зробити висновок, що найбільший інтерес представляють магнітострикційні і п'єзоелектричні випромінювачі, оскільки вони генерують ультразвук високої частоти.

Для того щоб дослідити вплив ультразвуку на теплообмін, було проведено експеримент по опроміненню ультразвуком розігрітої пластини в масляному середовищі.

Отримані результати експерименту дозволяють зробити висновок, що при опроміненні масляного середовища ультразвуком температура пластинки після охолодження нижча, ніж без використання ультразвуку, хоча і не значно, що в першу чергу пов'язано з невеликою енергією хвилі ультразвукового перетворювача. Варто відзначити, що при температурі нагріву пластинки вище 100 °С і короткому періоді охолодження пластини різниця стає більш помітною.

На основі отриманих даних було розраховано темп охолодження і коефіцієнт тепловіддачі.

Розрахунки свідчать, що найбільший коефіцієнт тепловіддачі при використанні ультразвуку, $528,5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, було досягнуто при температурі нагріву пластини $150 \text{ }^\circ\text{C}$ і періоді охолодження 15 с . Коефіцієнт тепловіддачі при використанні ультразвуку найбільше виріс порівняно з коефіцієнт тепловіддачі без використанні ультразвуку при початковій температурі нагріву пластини $50 \text{ }^\circ\text{C}$ періоді охолодження 15 с – на $33,9 \%$. Тобто найбільш ефективним є використання ультразвуку для охолодження при невисоких температурах нагріву і коротких періодах охолодження.

Можна зробити висновок, що інтенсифікація теплообміну в експерименті відбулася за рахунок ультразвукової кавітації, оскільки енергії ультразвукового перетворювача не вистачає на створення акустичних течій, було розраховано параметри ультразвукової кавітації:

- швидкість поширення ультразвукових хвиль в трансформаторному маслі $c = 1397,09 \text{ м/с}$;

- напівперіод хвилі $T = 2,5 \cdot 10^{-5} \text{ с}$;

- довжина хвилі $\lambda = 0,069 \text{ м}$;

- тиск $P = 350,69 \cdot 10^6 \text{ Па}$;

- резонансний розмір бульбашки $R_p = 0,065 \text{ м}$.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Радзишевський, А. Ю. Основы аналогового и цифрового звука / А. Ю. Радзишевский. – М.и: Издательский дом «Вильямс», 2006. – 288 с.
2. Шевченко, Е. В. Действие ультразвука на организм / Е. В. Шевченко, Н. А. Хлопенко // Сибирский медицинский журнал.– 2006. – №2. – С. 96-99.
3. Кикучи, Е. Ультразвуковые преобразователи / Е. Кикучи; пер. с япон. под ред. И. П. Голяминой. – М. : Изд-тво «Мир», 1972. – 424 с.
4. Хмелев, В. Н. Применение ультразвука высокой интенсивности в промышленности / В. Н. Хмелев, А. Н. Сливин, Р. В. Барсуков, С. Н. Цыганок, А. В. Шалунов. – Бийск : Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2010. – 203 с.
5. Красильников, В. А. Звуковые волны в воздухе, воде и твердых телах / В. А. Красильников. – [2-е изд, перераб.]. – М. : Гос. изд-во технико-теоретической литературы, 1954. – 440 с.
6. Розенберг, Л. Д. Ультразвук в технике: [стенограмма] / Л. Д. Розенберг. – М. : Изд-во «Знание», 1955. – 40 с.
7. Bontemps, A. Means to heat transfer for improving energy efficiency in heat exchangers / A. Bontemps // International Journal of Advances in Science and Technology. – 2012. – p. 34-41.
8. Агранат, Б. А. Основы физики и техники ультразвука: [учеб. пособ. для вузов] / Б. А. Агранат, М. Н. Дубровин, Н. Н. Хавский и др. – М. : Высшая школа, 1987. – 352 с.
9. Красильников, В. А. Звуковые и ультразвуковые волны в воздухе, воде и твердых телах / В. А. Красильников. – [3-е изд, перераб. и доп.]. – М. : Гос. изд-во физико-математической литературы, 1960. – 560 с.
10. Промтов, М. А. Кавитация: [Электронный ресурс] / М. А. Промтов. – Тамбов: Тамб. гос. тех. ун-т. – 18 с. – Режим доступа: <http://assets.utinlab.ru/uploads/ru/articles/Kavitac.pdf>.

11. Агранат, Б. А. Ультразвуковая технология: [учеб. пособ. для вузов] / Б. А. Агранат, В. И. Башкиров, Ю. И. Китайгородский, Н. Н. Хавский – М. : «Металлургия», 1974. – 503 с.
12. Leong, T. The fundamentals of power ultrasound – a review / T. Leong, M. Ashokkumar, S. Kentish // *Acoustics Australia*. – 2011. – Vol. 39 No. 2. – p. 54-63.
13. Stoforos, G. Acoustic enhancement of continuous flow cooling: a thesis submitted to the Master of Science: 18.08.2014. – Raleigh, North Carolina, 2014. – 273 p.
14. Майер, В. В. Простые опыты с ультразвуком / В. В. Майер. – М. : «Наука», 1978. – 160 с.
15. Legay, M., Gondrexon N., Le Person S., Boldo P., Bontemps A. Enhancement of heat transfer by ultrasound / M. Legay, N. Gondrexon, S. Le Person, P. Boldo, A. Bontemps // *International Journal of Chemical Engineering*. – 2011. – p. 1-17.
16. Зарембо, Л. К. Введение в нелинейную акустику // Л. К. Зарембо, В. А. Красильников. – М. : «Наука», 1966. – 520 с.
17. Шутилов, В. А. Основы физики ультразвука: [учеб. пособ.] / В. А. Шутилов. – Л. : Изд-во Ленингр. ун-та, 1980. – 280 с.
18. Schlichting, H. Berechnung ebener periodischer grenzschichtströmungen / H. Schlichting // *Phys. Zeitschr.*, 1932. – № 33. – s. 327-335.
19. Rayleigh, L. On the circulation of air observed in Kundt's tubes, and on some allied acoustical problems/ L. Rayleigh// *Philos. Trans. R.Soc. London*, 1884. – V. 175. – p. 1-21.
20. Кубанский, Н. П. Влияние акустических течений на процесс конвективного теплообмена / Н. П. Кубанский // *Акустический журнал*. – 1959. – Том 5, №1. – С. 51-57.
21. Радж, Б. Применения ультразвука / Б. Радж, В. Раджендран, П. Паланичам. – М. : Техносфера, 2006. – 576 с.

22. Киселев, Е. С. Интенсификация процессов механической обработки использованием энергии ультразвукового поля: [учебное пособие] / Е. С. Киселев. – Ульяновск : УлГТУ, 2003. – 186 с.

23. Гинстлинг, А. М. Ультразвук в процессах химической технологии / А. А. Гинстлинг, А. А. Барам. – Л. : Государственное научно-техническое издательство химической литературы, 1960. – 96 с.

24. Донской, А. В. Ультразвуковые электротехнические установки / А. В. Донской, О. Л. Келлер, Г. С. Кратыш. – [2-ое изд., перераб. и доп.] – Л. : Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1982. – 208с.

25. Ангелов, Г. С. Применение ультразвука в промышленности / Г. С. Ангелов, И. Н. Ермолов, А. И. Марков и др. – М. : «Машиностроение», 1975. – 240 с.

26. Пахомов, П. И. Пьезоэлектрические преобразователи: [метод. пособ. к лаб. и практ. занятиям] / П. И. Пахомов. – Бишкек : Кыргызско-Российский Славянский университет, 2001. – 40 с.

27. Бергман, Л. Ультразвук и его применение в науке / Л. Бергман; перев. с нем. яз. под ред. С. Григорьева, Л. Д. Розенберга. – [2-е изд.]. – М. : Издательство иностранной литературы, 1957. – 726 с.

28. А. с. СССР №800063 Поверхность теплообмена между теплоносителем и потребляющей средой с применением интенсификации нагрева или охлаждения / Кубанский П. Н. (СССР). – 1947. – 3 с.

29. Гортышев, Ю. Ф. Теплогидравлическая эффективность перспективных способов интенсификации теплоотдачи в канал теплообменного оборудования: [монография] / Ю. Ф. Гортышев, И. А. Попов, В. В. Олимпиев, А. В. Щелчков, С. И. Каськов. – Казань : Центр инновационных технологий, 2009. – 531 с.

30. Пат. DE102007040031 A1, МПК F24H1/20; F28F13/10. Спиральный теплообменный аппарат с ультразвуковым излучателем / Робионик Х.Д.; заявл. 24.08.07; опубл. 26.02.09.

31. Губарев, К. В. Интенсификация теплообмена за счет использования ультразвука / К. В. Губарев // Материалы Международной научно-практической конференции «Достижения молодых ученых в развитии инновационных процессов в экономике, науке, образовании». – Брянск: БГТУ, 2012. – С. 64-66.

32. Monnot, A. Enhancement of cooling rate by means of high frequency ultrasound/ A. Monnot, P. Boldo, N. Gondrexon, A. Bontemps // Heat Transfer Engineering. – 2007. – vol. 28, no. 1. – p. 3-9.

33. Gondrexon, N. Intensification of heat transfer process: improvement of shell-and-tube heat exchanger by means of ultrasound / N. Gondrexon, Y. Rousselet, M. Legay, P. Boldo, S. Le Person, A. Bontemps // Chemical engineering and processing. – 2010. – vol. 49 (9). – p. 936-942.

34. Yao, Y. Experimental Study on Heat Transfer Enhancement of Water-water Shell-and-Tube Heat Exchanger Assisted by Power Ultrasonic / Y. Yao, X. Zhang, Y. Guo // International Refrigeration and Air Conditioning Conference – July 12. – 15, 2010. – Purdue, p.1110.

35. Legay, M., Improvement of heat transfer by ultrasound: application to a double-tube heat exchanger / M. Legay, B. Simoni, P. Boldo, N. Gondrexon, S. Le Person, A. Bontemps // Ultrasonics sonochemistry. – 2012. – vol. 19. – p.1194-1200.

36. Ильин ,С. В. Влияние ультразвука на теплові процесі в обмотках масляних трансформаторов/ С. В. Ильин// Восточно-Европейский журнал передовіх технологий. – 2012. – с. 7-8.

37. Масла трансформаторные: ГОСТ 982-80 – ГОСТ 982-80. – [Действительный от 1980-11-24] – М. : Государственный комитет СССР по стандартам, 1980. – Государственный стандарт СССР.

38. Офіційний сайт магазину New Cool [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://newcool.kiev.ua/otpugivateli-gryzunov/ultrazvukovoj-otpugivatel-gryzunov-i-nasekomykh-elektronnyj-kot.html>.

39. Співак, О. Ю. Теплотехнічні вимірювання та прилади: [навч. посіб.] / О. Ю. Співак. – Вінниця : ВНТУ, 2013. – 111 с.
40. Курилов, А. Ф. Теплотехнічні вимірювання і прилади: [навч. посіб.] / А. Ф. Курилов, В. М. Козін. – Суми : Сумський державний університет, 2015. – 189 с.
41. Авчухов, В. В. Задачник по процессам тепломассобмена: [учебное пособие] / В. В. Авчухов, Б. Ю. Паюсте. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 144 с.
42. Сиротюк, М. Г. Ультразвуковая кавитация / М. Г. Сиротюк // Акустический журнал. – 1962. – № 3 (Том VIII). – С. 255-272.
43. Сиротюк, М. Г. Об энергетике и динамике кавитационной области / М. Г. Сиротюк // Акустический журнал. – 1967. – № 2 (Том XIII). – С. 265-269.
44. Винокурова, Л. Е. Основи охорони праці: [підручник] / Л. Е. Винокурова, М. В. Васильчук, М. В. Гаман. – [2-ге вид., допов., перероб.]. – К. : Вікторія, 2001. – 192 с.
45. Голінько, В. І. Основи охорони праці: підручник / В. І. Голінько. – [2-ге вид.]. – Д. : НГУ, 2014. – 271 с.
46. Одарченко, М. С. Основи охорони праці: [підручник] / М. С. Одарченко, А. М. Одарченко, В. І. Степанов, Я. М. Черненко. – Х. : Стиль-Издат, 2017. – 334 с.
47. Серіков, Я. О. Основи охорони праці: [навчальний посібник] / Я. О. Серіков. – Х. : ХНАМГ, 2007. – 227 с.
48. Гандзюк, М. П. Основи охорони праці : [підручник] / М. П. Гандзюк, Є .П. Желібо, М. О. Халімовський. – К. : Каравела, 2004. – 408 с.
49. Абільтарова, Е. Н. Основи охорони праці. Модуль 1: Правові та організаційні питання охорони праці, основи фізіології, гігієни праці та виробничої санітарії : [навч.-метод. посібник] / Е. Н. Абільтарова, М. С. Корець, С. М. Яшанов. – К. : НПУ ім. М. П. Драгоманова, 2010. – 409 с.

50. Березуцький, В. В. Основи охорони праці: [навч. посіб.] / В. В. Березуцький, Т. С. Бондаренко, Г. Г. Валенко та ін. – [2-ге вид., перероб. і доп.]. – Х. : Факт, 2007. – 480 с.

51. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень: ДСН 3.3.6.042-99. – [Чинний від 1999-12-01]. – К. : МОЗ України, 1999.

52. Грибан В. Г., Негодченко О. В. Охорона праці: [навч. посіб.] / В. Г. Грибан, О. В. Негодченко. – [2-ге вид.]. – К. : Центр учбової літератури, 2011. – 280 с.

53. Природне і штучне освітлення: ДБН В.2.5-28-2006. – [Чинний від 2006-10-01]. – К. : Мінбуд України, 2006.

54. Щербина, Н. В. Охрана труда: проектирование и расчет производственного освещения: метод. пособ. / Н. В. Щербина, Д. А. Мельниченко, А. В. Копыток. – Минск : БГУИР, 2009. – 36 с.

55. Запорожець, О. І. Основи охорони праці: [підручник] / О. І. Запорожець, О. С. Протоєрейський, Г. М. Франчук, І. М. Боровик. – [2-ге вид.]. – К. : «Центр учбової літератури», 2017. – 264 с.

56. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку: ДСН 3.3.6037-99. – [Чинний від 1999-12-01]. – К. : МОЗ України, 1999.

57. Ткачук, К. Н. Основи охорони праці: [підручник] / К. Н. Ткачук, М. О. Халімовський, В. В. Зацарний, Д. В. Зеркалов, Р. В. Сабарно, О. І. Полукаров, В. С. Коз'яков, Л. О. Мітюк. – [2-ге вид., допов. та перероб.]. – К. : Основа, 2006. – 448 с.

58. Охрана труда в электроустановках / под ред. Б. А. Князевского. – [3-е изд., перераб. и доп.]. – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 336 с.

59. Правила пожежної безпеки в Україні: НАПБ А.01.001-2004. – [Чинний від 2014-12-30]. – К. : МВС України, 2014.

60. Ільїн, С. В., Іванісова, А. П. Дослідження впливу звукових коливань на теплообмінні процеси в рідині / С. В. Ільїн, А. П. Іванісова // Матеріали ХХІІ науково-технічної конференції студентів, магістрантів, аспірантів і викладачів ЗДІА 2017: енергетика, електроніка та інформаційні технології. – Том ІІІ. – Запоріжжя: ЗДІА, 2017. – С. 55.

Таблиця А.1 – Фізико-механічні властивості магнітострикційних матеріалів

Матеріал	Хімічний склад	Щільність ρ , г / см ³	Межа міцності σ_B , кгс / мм ²	Швидкість звуку c_M , м / с	Модуль пружності E , 10^{-4} , кгс / мм ²	Питомий електричний опір $\rho_{ел} \cdot 10^{-8}$, Ом·м	Коерцетивна сила H_c , А / м	Індукція насиченості B_s , Гс	Магнітострикція насиченості $(\Delta l/l)_s \cdot 10^{-6}$
Нікель	100 % Ni	8,8	47	4850	2,1	7	56	6,4	-35
Пермендюр К49Ф2	49% Co; 1,5-1,8 % V; інше Fe	8,08	45	5200	2,18	26	180	2,4	70
Сплав К65	65 % Co	8,25	67	5200	2,24	8	300	2,2	90
Алюфер Ю14	13,8% Al; інше Fe	6,65	79	5160	1,77	90	56	13,4	40

Таблиця Б.1 – Фізико-механічні характеристики п'єзоматеріалів

П'єзоматеріали	П'єзоелектричний модуль d 10^{12} , м/в	П'єзоелектрична константа, н/вм	П'єзоелектрична константа тиску g 10^3 в м/н	П'єзоелектрична константа деформації h 10^3 , в/м	Коефіцієнт електромеханічного зв'язку	Діелектрична постійна	Щільність ρ 10 , кг/м ³	Швидкість поширення пружних коливань C 10^3 , м/с	Питомий хвильовий опір ρ_e , кг/м ² с	Модуль Юнга $E_{10} 10^{10}$, н/м ²	Граничне механічне напруження σ_n 10^8 , н/м ²	Температура точки Кюри t_{c12} , °С
Кварц	2,3	0,17	57	4,8	10	4,5	2,65	5,74	15,4	8,6	95	550
Сегнотова сіль	36/25 11/55	36/25 0,11/0,08	36/25 160/60 0	36/25 1,6/1,9	29	9,4	1,77	2,4	4,3	1,0	14	45
Сульфат літія	16	0,9	190	9	38	10,3	2,06	5,46	11,2	6,2	15	75
Титан барія	150	16,7	12	1,2	50	1200	5,5	5,68	31,2	18,0	80	100
Цирконат титан-свинцю	33	16,7	33	1,7	50	1200	7,0	5,0	35,0	20,0	80	350
Метаниобат свинцю	165	4,8	40	1,2	42	225	5,8	2,76	16,0	0,46	-	550