

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Інтенсифікація теплообміну

Дослідження впливу ультразвуку на теплообмінні процеси в рідині

2018

АНОТАЦІЯ

Актуальність теми – інтенсифікація теплообмінних процесів акустичним способом дозволить підвищити ефективність використання енергетичного обладнання, призведе до зниження витрат викопного палива. Отже, тема дослідження є актуальним напрямом впровадження енергозберігаючих технологій.

Мета роботи – експериментально дослідити вплив ультразвуку на охолодження розігрітої пластини в масляному середовищі.

Завдання роботи – дослідити вплив ультразвуку на рідину, експериментально дослідити вплив ультразвуку на охолодження розігрітої пластини в масляному середовищі, на основі отриманих даних розрахувати темп охолодження і коефіцієнт тепловіддачі, параметри ультразвукової кавітації.

Методи дослідження – експеримент, порівняння, розрахунок.

В ході наукової роботи було проведено експеримент по опроміненню ультразвуком трансформаторного масла, в яке була занурена розігріта пластина. На основі отриманих даних було розраховано темп охолодження і коефіцієнт тепловіддачі, параметри ультразвукової кавітації.

Наукова робота складається з вступу, двох розділів, висновків, переліку джерел посилань. Наукова робота містить: 32 с., 13 рис., 10 табл., 21 джерело, 1 додаток.

Ключові слова: УЛЬТРАЗВУК, КАВІТАЦІЯ, АКУСТИЧНА ТЕЧІЯ, ТЕПЛОМАСООБМІН, ІНТЕНСИФІКАЦІЯ.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
1 ОСНОВНІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ.....	6
2 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ УЛЬТРАЗВУКУ НА ТЕПЛООБМІН.....	11
2.1 Опис експерименту.....	11
2.2 Результати експерименту.....	14
2.3 Розрахунок темпу охолодження і коефіцієнту тепловіддачі	18
2.4 Параметри ультразвукової кавітації.....	26
ВИСНОВКИ.....	28
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ.....	30
ДОДАТОК А.....	32

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 зменшити 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 визначають 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.

1 ОСНОВНІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Ультразвук являє собою механічні коливання пружного середовища, що займають область вище 20000 Гц. Верхня межа спектра ультразвукових коливань не встановлена [1]. Основні характеристики ультразвуку – це частота, довжина і швидкість хвилі.

Частота (f) — це кількість коливань, що здійснює система в одиницю часу. Одиницею виміру є Герц (Гц) [2].

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

$$c = \sqrt{\frac{1}{k \cdot \rho}}, \quad (1.1)$$

де k – коефіцієнт стискання рідини, тобто відносна зміна її об'єму при зміні тиску, що рівний одиниці;

ρ – щільність рідини, кг/м³ [3].

Поряд з частотою характерним параметром кожного звукового коливання є довжина хвилі (λ), тобто відстань, яке звукова хвиля проходить за час одного повного коливання. Довжину хвилі λ можна знайти за формулою, м

$$\lambda = \frac{c}{f}. \quad (1.2)$$

З цього співвідношення випливає, що для кожної середовища довжина хвилі і частота обернено пропорційні: чим більше частота, тим менше довжина хвилі [4].

Період коливань T – це час, необхідний частці для здійснення одного коливального руху [2].

Коли ультразвук впливає на дно посудини з рідиною, в ній виникають наступні ефекти, які показано на рисунку 1.1 [5]:

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

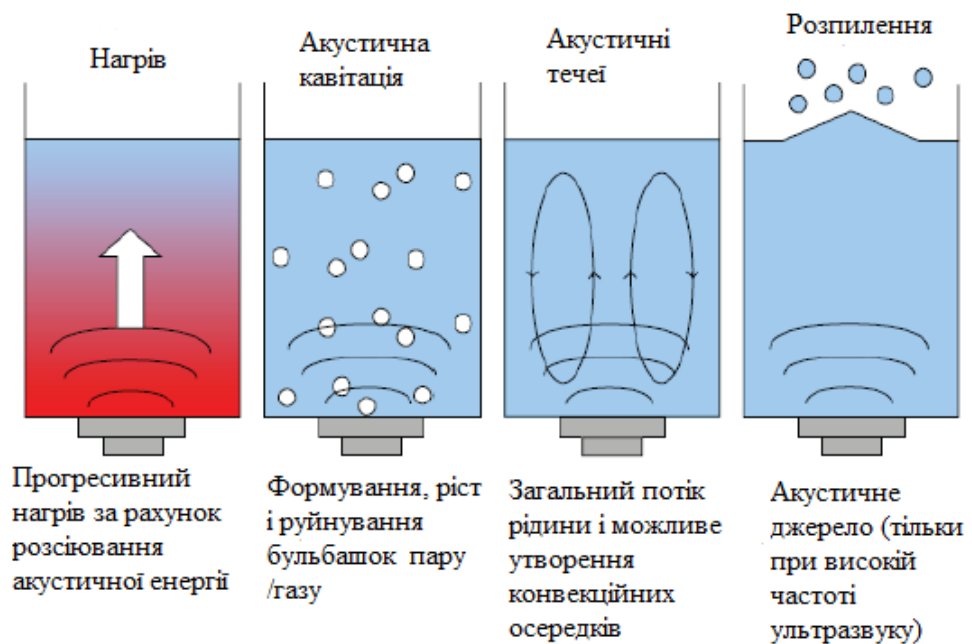


Рисунок 1.1 – Ефекти, що виникають в результаті поширення ультразвуку в рідині

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 [6].

Розглянемо детально процес формування кавітації в рідині, який зображено на рисунку 1.2 [7].

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.

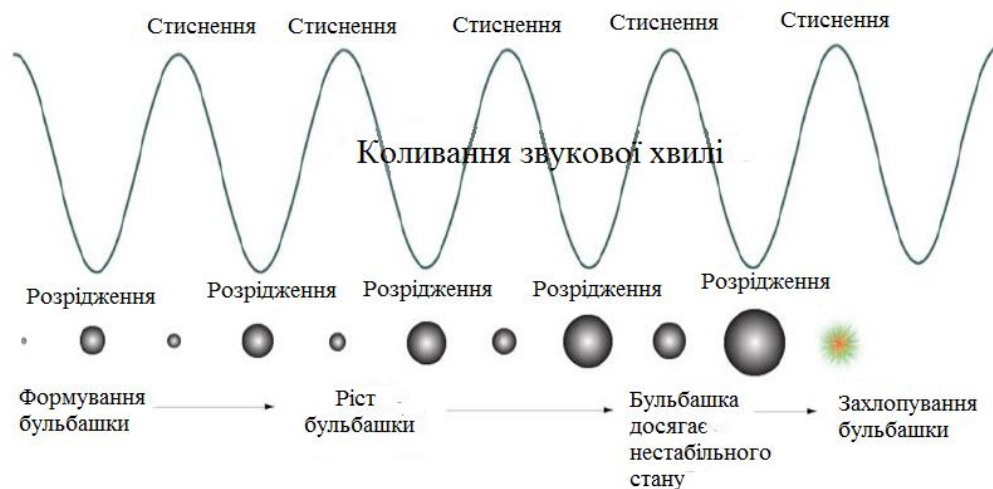


Рисунок 1.2 – Формування, ріст і захопування бульбашок

У фазу розрідження (зниженого тиску) в найбільш «слабких» місцях починається виділення розчинених газів з утворенням бульбашки [2]. Ці «слабкі» місця називаються зародки кавітації.

Зародками кавітації можуть бути дрібні бульбашки газу, нерозчиненого в рідині, а також не змочувані тверді частинки [8].

Існуючі бульбашки під дією від'ємного тиску починають коливатися. 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, м

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

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

p – тиск рідини, Па;

ω – кутова частота ультразвуку, s^{-1} [7].

Є дві можливості, після того, як бульбашка досягла резонансного розміру: бульбашка продовжує колитися в межах резонансного розміру (стабільна кавітація) або бульбашка захоплюється (нестабільна кавітація) [9].

При захопленні кавітаційної бульбашки виникає ударна хвиля, що розвиває величезний тиск. Якщо ударна хвиля зустрічає на своєму шляху перепону, то вона руйнує її поверхню [10].

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 прикордонні шари, тим самим зменшуючи тепловий опір і створюючи мікротурбулентність [11].

Акустичними течіями зазвичай називають стаціонарні вихрові потоки рідини чи газу, що виникають в звуковому полі [12].

Розрізняють течії трьох типів:

а) шліхтингова течія – течії, що виникають в в'язкому прикордонному 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 [8].

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

Ультразвуковий перетворювач – це пристрій, який може перетворювати електричну енергію в звукові хвилі високої частоти і навпаки [13].

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

Найбільший інтерес представляють магнітострикційні і п'єзоелектричні перетворювачі, оскільки лише вони здатні генерувати коливання ультразвукового діапазону.

В основі роботи магнітострикційного перетворювача лежить магнітострикційний ефект, який був відкритий Джоулем в 1847 р. Джоуль виявив, що феромагнітне тіло при намагнічуванні змінює свої геометричні розміри, тобто деформується. Існує також зворотний магнітострикційний ефект, що полягає в зміні намагніченості тіла при його деформації [14].

В основі роботи п'єзоелектричного перетворювача лежить п'єзоелектричний ефект. 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 (змінює розміри) кристал [15].

2 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ УЛЬТРАЗВУКУ НА ТЕПЛООБМІН

2.1 Опис експерименту

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

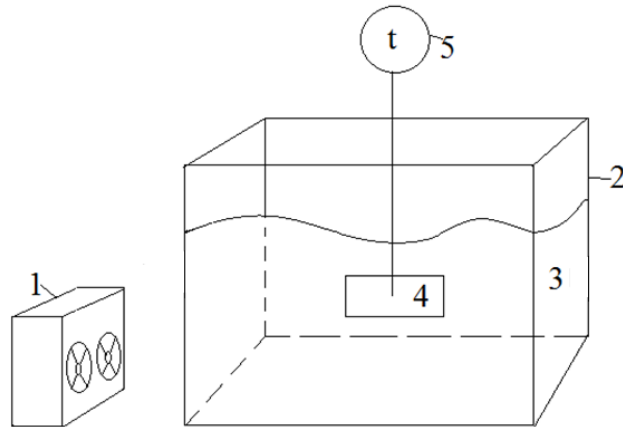
Метою даного експерименту є дослідити як ультразвук впливає на швидкість охолодження розігрітої пластини в масляному середовищі.

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 [16].

На рисунку 2.1 представлена 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 τ . Температуру пластинки t вимірюємо за допомогою терморпари 5. Повторюємо експеримент опромінюючи масляне середовище ультразвуком, яке випромінює ультразвуковий перетворювач 1. Повторюємо експеримент

декілька разів змінюючи температуру нагріву пластинки від 50 до 150 °С з кроком 25 °С, а час охолодження – від 15 с до 60 с з кроком 15 с.



1 – ультразвуковий перетворювач; 2 – бак; 3 – трансформаторне масло;
4 – латунна пластина; 5 – термопара.

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

Фотографію 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 Додатку А [17].

В якості ультразвукового перетворювача використовуємо ультразвуковий електронний відлякувач гризунів та комах VSG-316 DUAL SONIC PEST REPELLER, зовнішній вигляд якого представлено на рисунку 2.3 [18]. Технічні характеристики апарату представлено в таблиці 2.1.



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

Таблиця 2.1 – Технічні характеристики ультразвукового перетворювача 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 вимірювання температури використовуємо хромель-алюміневу термопару (ТХА), що здатна вимірювати температуру в діапазоні від -50 до 1000 °С і має похибку виміру $\pm 0,5 \%$.

2.2 Результати експерименту

Після проведення експерименту, його результати було оброблено за допомогою Microsoft Excel. В таблиці 2.2 представлено результати експерименту за період часу охолодження 15 с.

Таблиця 2.2 – 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 представлено графічно на рисунку 2.4.

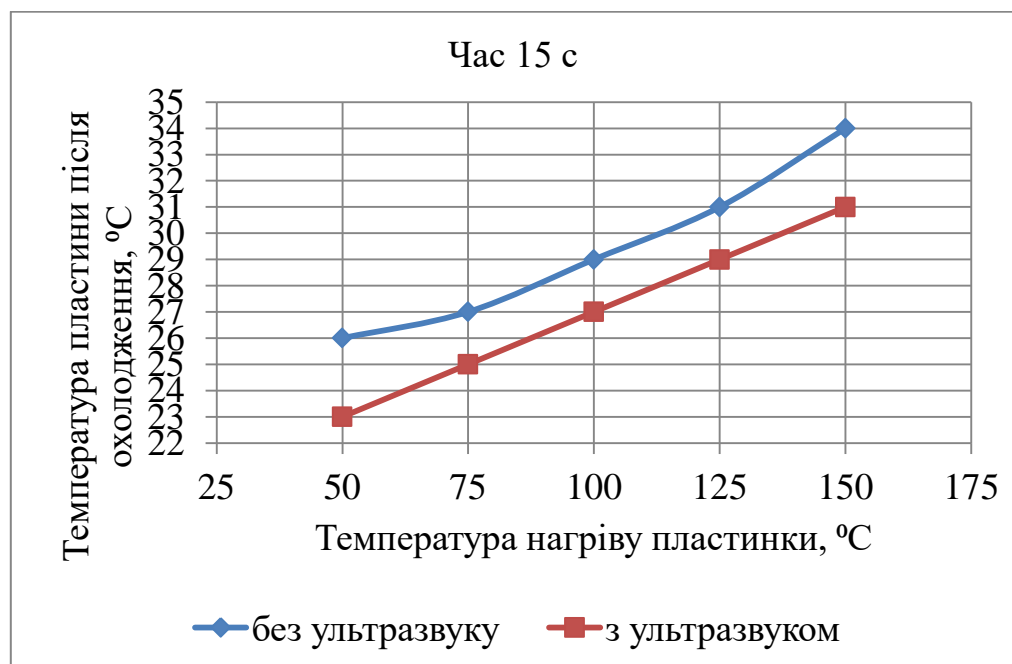


Рисунок 2.4 – Графік залежності температури охолодження пластини від температури нагріву пластинки за період часу 15 с

В таблиці 2.3 представлено результати експерименту за період часу охолодження 30 с.

Таблиця 2.3 – Результати дослідів за період часу 30 с

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

Для наочності результати експерименту за період часу 30 с представлено графічно на рисунку 2.5.

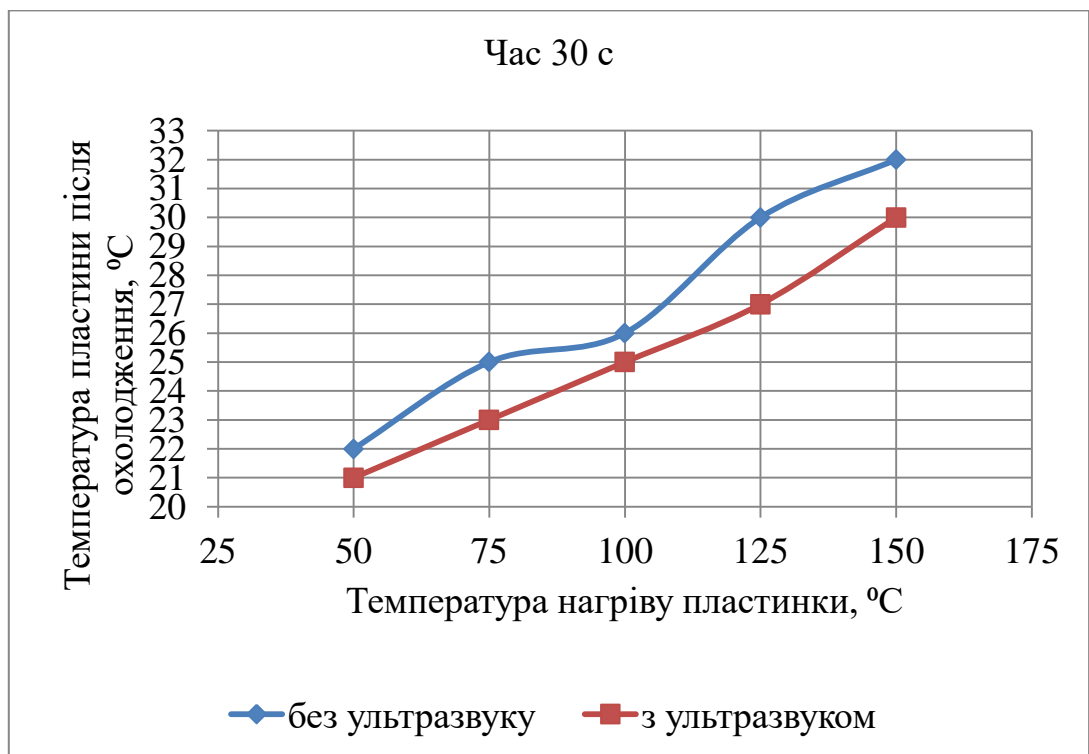


Рисунок 2.5 – Графік залежності температури охолодження пластини від температури нагріву пластинки за період часу 30 с

В таблиці 2.4 представлено результати експерименту за період часу охолодження 45 с.

Таблиця 2.4 – Результати дослідів за період часу 45 с

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

Для наочності результати експерименту за період часу 45 с представлено графічно на рисунку 2.6.

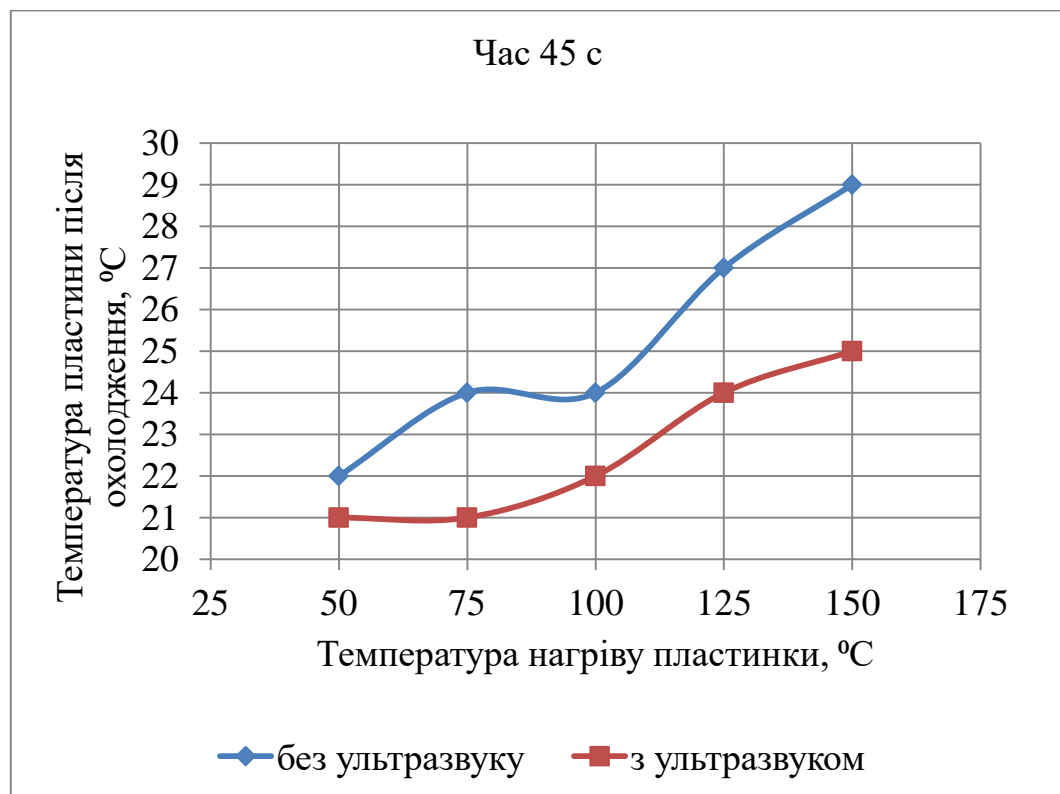


Рисунок 2.6 – Графік залежності температури охолодження пластини від температури нагріву пластинки за період часу 45 с

В таблиці 2.5 представлено результати експерименту за період часу охолодження 60 с.

Таблиця 2.5 – Результати дослідів за період часу 60 с

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

Для наочності результати експерименту за період часу 60 с представлено графічно на рисунку 2.7.

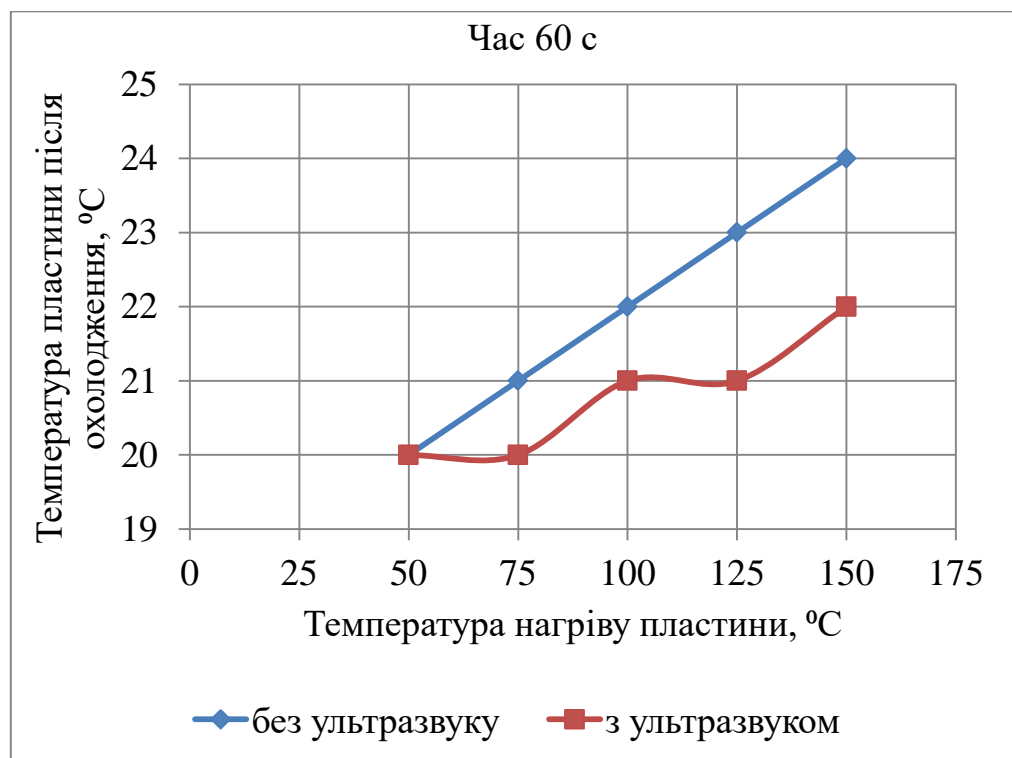


Рисунок 2.7 – Графік залежності температури охолодження пластини від температури нагріву пластини за період часу 60 с

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 °С 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

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

де $v_1=t_1-t_c$ і $v_2=t_2-t_c$ – 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, s^{-1}

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

де ψ – коефіцієнт нерівномірності розподілу температури в тілі, який для термічно тонких тіл дорівнює 1 [19];

ρ – густина тіла, $кг/м^3$, що для латуні дорівнює $8400 кг/м^3$;

c – питома теплоємність тіла, $кДж/(м^2 \cdot К)$ що для латуні дорівнює $0,38 кДж/(м^2 \cdot К)$;

F – площа поверхні тіла, $м^2$, 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, $м^3$, 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 , $Вт/(м^2 \cdot К)$

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

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

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

Зробимо припущення, що в першу секунду охолодження температура пластини не змінюється.

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, с⁻¹

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

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

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

Так само було розраховано темп охолодження і коефіцієнт тепловіддачі для температур 75, 100, 125 і 150 °С.

Аналогічні розрахунки було проведено для періодів часу 30, 45 і 60 с та результатів експерименту при використанні ультразвуку.

Результати розрахунку темпу охолодження і коефіцієнту тепловіддачі для періоду часу 15 с представлено в таблиці 2.6.

Результати розрахунку представлено графічно на рисунку 2.8.

Таблиця 2.6 – Результати розрахунку темпу охолодження і коефіцієнту тепловіддачі для періоду часу 15 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	0,099	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

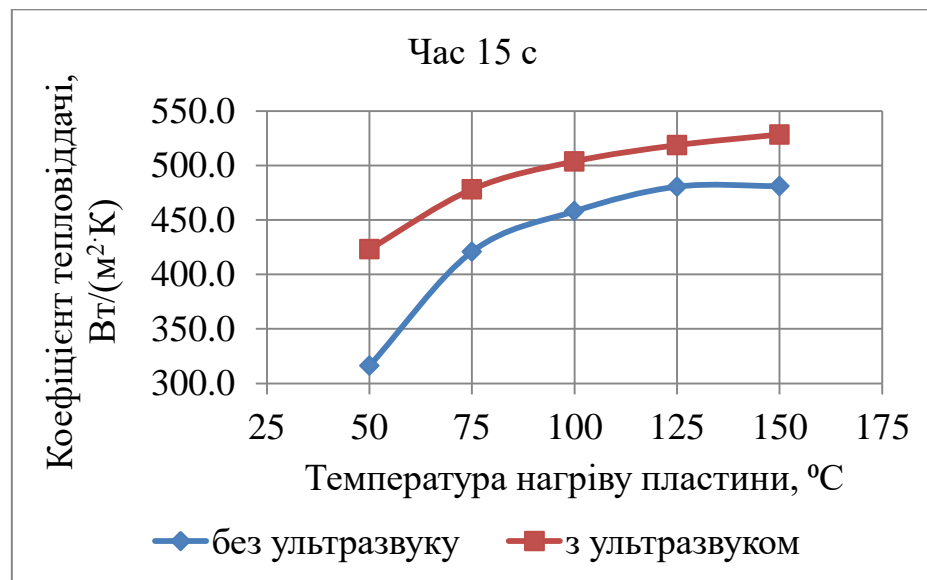


Рисунок 2.8 – Графік залежності коефіцієнту тепловіддачі від температури нагріву пластинки для періоду часу 15 с

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 50 °С – на 33,9 %. При більш високих температурах нагріву пластини різниця між коефіцієнтами тепловіддачі стає меншою. Варто відзначити, що при

температурах нагріву пластини 125 °С і вище, коефіцієнт тепловіддачі без використання ультразвуку майже не змінюється, тоді як коефіцієнт тепловіддачі при використанні ультразвуку продовжує зростати.

Результати розрахунку темпу охолодження і коефіцієнту тепловіддачі для періоду часу 30 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 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

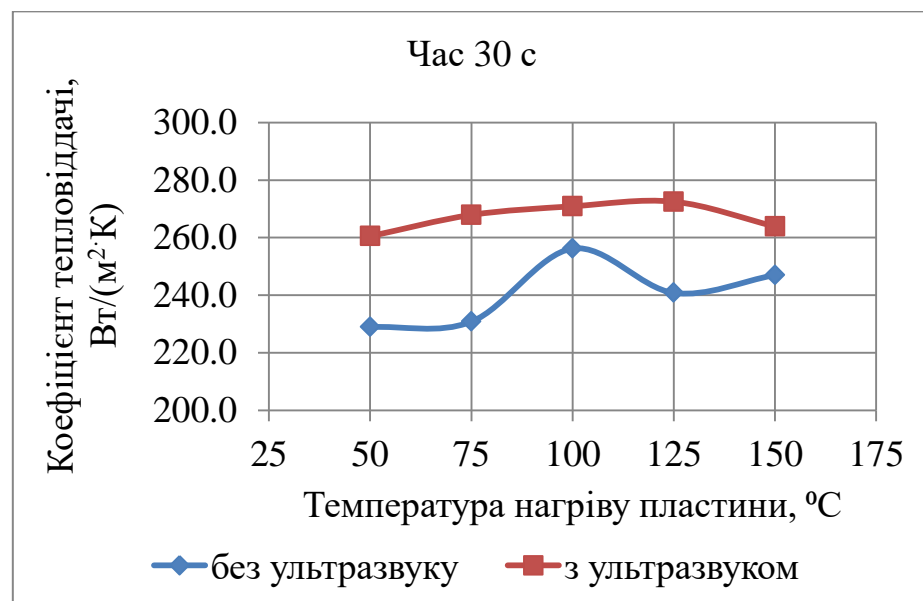


Рисунок 2.9 – Графік залежності коефіцієнту тепловіддачі від температури нагріву пластинки для періоду часу 30 с

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 16,0 %. Можна спостерігати стрибок коефіцієнта тепловіддачі без використання ультразвуку при температурі нагріву 100 °С, коли досягає максимуму – 256,2 Вт/(м²·К).

Результати розрахунку темпу охолодження і коефіцієнту тепловіддачі для періоду часу 45 с представлено в таблиці 2.8. Результати розрахунку представлено графічно на рисунку 2.10.

Таблиця 2.8 – 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

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 нагріву пластини до температури 125 °С.

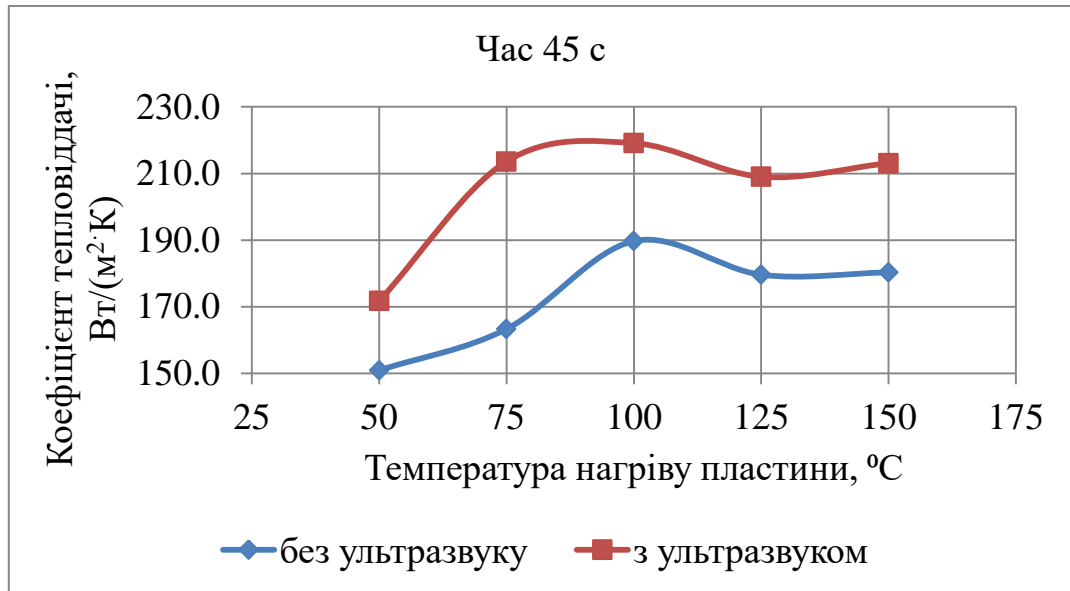


Рисунок 2.10 – Графік залежності коефіцієнту тепловіддачі від температури нагріву пластинки для періоду часу 45 с

Результати розрахунку темпу охолодження і коефіцієнту тепловіддачі для періоду часу 60 с представлено в таблиці 2.9. Результати розрахунку представлено графічно на рисунку 2.11.

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

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

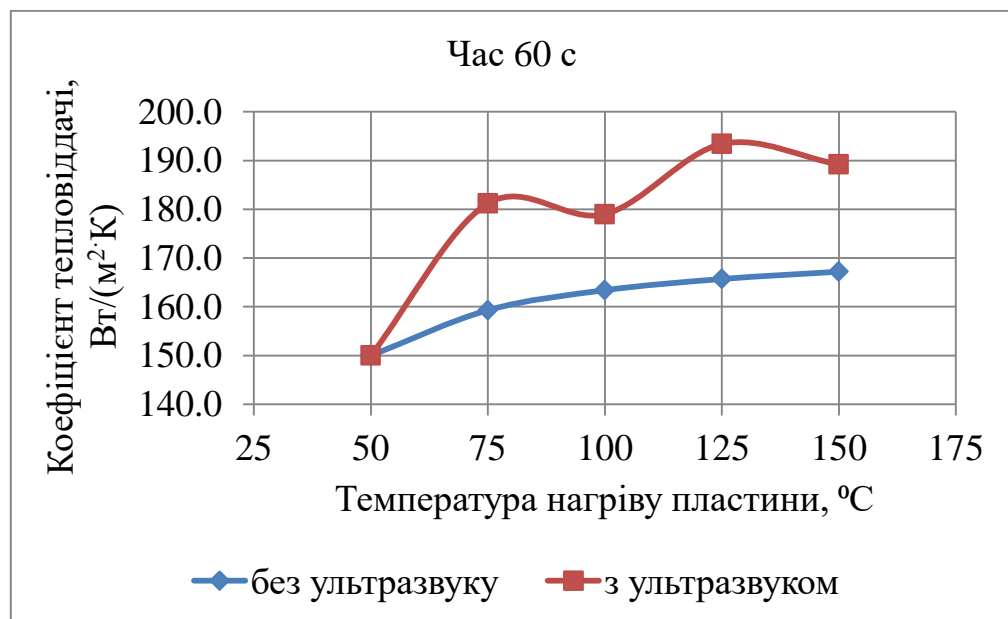


Рисунок 2.11 – Графік залежності коефіцієнту тепловіддачі від температури нагріву пластинки для періоду часу 60 с

Отже, можемо зробити висновок, що найбільший коефіцієнт тепловіддачі, 528,5 Вт/(м²·К), було досягнуто при використанні ультразвуку, температурі нагріву пластини 150 °С 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 °С 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

Під кавітацією розуміють створення в рідині, при розповсюдженні в ній ультразвуку, що створює від'ємний тиск, бульбашок, які потім швидко захлопуються [20].

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 захлопування бульбашки виділяється в вигляді енергії ударної хвилі [21].

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

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

Довжину хвилі ультразвуку знайдемо за формулою (1.2), 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.

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.

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, 528,5 Вт/(м²·К), було досягнуто при використанні ультразвуку, температурі нагріву пластини 150 °С 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.

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 $c = 1397,09$ м/с;
- напівперіод хвилі $T = 2,5 \cdot 10^{-5}$ с;
- довжина хвилі $\lambda = 0,069$ м;
- тиск $P = 350,69 \cdot 10^6$ Па;
- резонансний розмір бульбашки $R_p = 0,065$ м.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Шевченко, Е. В. Действие ультразвука на организм / Е. В. Шевченко, Н. А. Хлопенко // Сибирский медицинский журнал. – 2006. – №2. – С. 96 - 99.
2. 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.
3. 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.
4. Розенберг, Л. Д. Ультразвук в технике: [стенограмма] / Л. Д. Розенберг. – М.: Изд-во «Знание», 1955. – 40 с.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. Майер, В. В. Простые опыты с ультразвуком / В. В. Майер. – М.: «Наука», 1978. – 160 с.

11. Legay, M. 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.
12. Зарембо, Л. К. Введение в нелинейную акустику // Л. К. Зарембо, В. А. Красильников. – М.: «Наука», 1966. – 520 с.
13. Радж, Б. Применения ультразвука / Б. Радж, В. Раджендран, П. Паланичам. – М. Техносфера, 2006. – 576 с.
14. 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.
15. Киселев, Е. С. Интенсификация процессов механической обработки использованием энергии ультразвукового поля: [учебное пособие] / Е. С. Киселев. – Ульяновск: УлГТУ, 2003. – 186 с.
16. Ильин ,С. В. Влияние ультразвука на тепловые процессы в обмотках масляных трансформаторов / С. В. Ильин // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. – 2012. – с. 7-8.
17. Масла трансформаторные: ГОСТ 982-80 – ГОСТ 982-80. – [Действительный от 1980-11-24] – М. : Государственный комитет СССР по стандартам, 1980. – Государственный стандарт СССР.
18. Офіційний сайт магазину New Cool [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://newcool.kiev.ua/otpugivateli-gryzunov/ultrazvukovoj-otpugivatel-gryzunov-i-nasekomykh-elektronnyj-kot.html>.
19. Авчухов, В. В. Задачник по процессам тепломассобмена: [учебное пособие] / В. В. Авчухов, Б. Ю. Паюсте. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 144 с.
20. Сиротюк, М. Г. Ультразвуковая кавитация / М. Г. Сиротюк // *Акустический журнал*. – 1962. – № 3 (Том VIII). – С. 255-272.
21. Сиротюк, М. Г. Об энергетике и динамике кавитационной области / М. Г. Сиротюк // *Акустический журнал*. – 1967. – № 2 (Том XIII). – С. 265-269.

ДОДАТОК А

Таблиця А.1 – Фізико-хімічні характеристики трансформаторного масла марки Т-1500

Показник	Т-1500
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
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