

Имя пользователя:
Баранюк Александр Володимирович

ID проверки:
1011604863

Дата проверки:
17.06.2022 15:10:36 EEST

Тип проверки:
Doc vs Internet + Library

Дата отчета:
17.06.2022 15:11:13 EEST

ID пользователя:
100007114

Название файла: TF-81-Fedorets-diploma-2022

Количество страниц: 50 Количество слов: 7749 Количество символов: 61474 Размер файла: 3.82 MB ID файла: 1011473364

3.7% Совпадения

Наибольшее совпадение: 0.95% с Интернет-источником (<https://www.intechopen.com/chapters/72356>)

2.84% Источники из Интернета 45 Страница 52

2.04% Источники из Библиотеки 127 Страница 52

0% Цитат

Исключение цитат выключено

Исключение списка библиографических ссылок выключено

0% Исключений

Нет исключенных источников

Модификации

Обнаружены модификации текста. Подробная информация доступна в онлайн-отчете.

Замененные символы 49

АНОТАЦІЯ

Дипломний проект першого (бакалаврського) рівня вищої освіти на тему „Особливості теплообміну і механізму процесу конденсації при використанні сучасних поверхнево-активних речовин в теплообмінних апаратах”: пояснювальна записка на 67 сторінках, 21 рисунок, 2 таблиці, 31 перелік посилань, креслень - 3 арк. ф. А1.

Мета - проведення дослідження теплообміну і механізму процесу конденсації на різних поверхнях із застосуванням новітніх поверхневих-активних речовин в теплообмінних апаратах.

Проведений аналіз стану проблеми використання поверхнево-активних речовин в теплообмінних апаратах. Розглянуті схеми дослідного модуля для вивчення процесу краплинної конденсації, в умовах різнотипних теплообмінних апаратів на гідрофобних поверхнях. Досліджені основні закономірності механізму процесу конденсації в присутності поверхнево-активних речовин. Оброблені експериментальні дані для теплообмінників типу «труба в трубі», пластинчатого та кожухотрубного ТОА. Розроблені заходи з правил техніки безпеки під час проведення дослідів. Розглянуті питання охорони праці та безпеки життєдіяльності в надзвичайних ситуаціях.

На кресленнях наведені теплообмінні апарати кожухотрубний, пластинчастий і типу труба в трубі.

Ключові слова: поверхнево-активні речовини, краплинна конденсація, плівкова конденсація, теплообмінний апарат.

ANNOTATION

Diploma project of the first (bachelor's) level of higher education on "Features of heat transfer and the mechanism of condensation in the use of modern surfactants in heat exchangers": an explanatory note to 67 pages, 21 Fig., 2 Tables, 31 list of references, drawings - p. 3 f. A1.

The aim is to study the heat transfer and the mechanism of the condensation process on different surfaces with the use of the latest surfactants in heat exchangers.

The analysis of the state of the problem of the use of surfactants in heat exchangers is carried out. The schemes of the experimental module for studying the process of droplet condensation in the conditions of different types of heat exchangers on hydrophobic surfaces are considered. The basic regularities of the mechanism of condensation process in the presence of surfactants are investigated. Experimental data for tube-in-tube heat exchangers, plate and shell-and-tube TOA were processed. Safety rules were developed for measures on during experiments. Issues of labor protection and life safety in emergencies are considered.

The drawings show heat exchangers shell-tube, plate and pipe-in-tube type.

Key words: surfactants, droplet condensation, film condensation, heat exchanger.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	9
ВСТУП.....	
1.СУЧАСНИЙ СТАН ПРОБЛЕМИ ВИКОРИСТАННЯ ПОВЕРХНЕВО-АКТИВНИХ РЕЧОВИН В ТЕПЛООБМІННИХ АПАРАТАХ.....	13
1.1 Стан проблеми.....	13
1.2 Способи отримання краплинної конденсації.....	16
2.ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ СТЕНДИ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ.....	19
2.1 Опис дослідного модуля на базі кожухотрубного ТОА.....	19
2.2 Опис візуально-експериментальної ділянки на базі кожухотрубного апарата.....	
2.3 Опис інших варіантів дослідних установок.....	22
2.4 Експериментальний коефіцієнт тепловіддачі при конденсації.....	2
2.5 Гідрофобізація теплообмінної поверхні та її нанесення.....	25
2.6 Дослідження механізму краплинної конденсації.....	26
3.ОСНОВНІ ЗАКОНОМІРНОСТІ МЕХАНІЗМУ ПРОЦЕСУ КОНДЕНСАЦІЇ.....	29
3.1 Крайовий кут змочування.....	29
3.2 Розподіл краплин за розмірами.....	33
4.ТЕПЛООБМІН ПРИ КОНДЕНСАЦІЇ В ДОСЛІДНИХ АПАРАТАХ	35
4.1 Теплообмін на поверхні дослідного апарату типу «труба в трубі».....	35
4.2 Розрахунок за візуальною картиною процесу краплинної конденсації.....	38
4.3 Обробка даних теплообмінника типу «труба в трубі» та кожухотрубного.....	41
4.4 Узагальнення дослідних даних для поверхні пластинчастого ТОА.....	41
4.5 Обробка даних пластинчастого теплообмінного апарату.....	44
5.ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ.....	46
5.1 Технічні рішення та організаційні заходи щодо забезпечення безпеки проведення досліджень на експериментальній установці.....	48
5.2 Технічні рішення та організаційні заходи з гігієни праці та санітарії.....	52

5.3 Пожежна безпека та профілактика.....	59
ВИСНОВКИ.....	60
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	62
Додаток А.....	65
Додаток Б.....	67

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

D, d – діаметр;
F – площа;
f – площа перерізу;
 δ – товщина плівки рідини;
P – тиск;
T, t – температура;
V – об'ємна витрата;
G – масова витрата;
 ρ – густина;
r – теплота пароутворення;
 λ – коефіцієнт теплопровідності;
 μ – коефіцієнт динамічної в'язкості;
 ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості;
C_p – ізобарна теплоємність;
Q – тепловий потік;
q – густина теплового потоку;
 α – коефіцієнт тепловіддачі;
W – швидкість;
 Δt – температурний напір;
T – час циклу конденсації;
 σ – коефіцієнт поверхневого натягу;
 ψ – кут нахилу конденсатної поверхні;
 θ – кут змочування;
A – безрозмірний комплекс;
g – прискорення вільного падіння;
N – кількість центрів конденсатних утворень;

Безрозмірні комплекси

$Re = \frac{W \cdot d}{\nu}$ – число Рейнольдса;

$Nu = \frac{\alpha \cdot d}{\lambda}$ – число Нуссельта;

$Pr = \frac{\nu}{a}$ – критерій Прандтля;

Індекси

п – пар;

р – рідина;

вод – вода;

кон – конденсація;

' – значення на вході (початкове);

" – значення на виході (кінцеве);

п – пара;

кр – краплинний;

сер – середній;

екв – еквівалентний;

мін – мінімальний;

мах – максимальний;

відр. – відривний;

i, j – поточний радіус;

експ – експериментальний;

роз – розрахунковий.

Скорочення

ТОА – теплообмінний апарат;

PTFE – політетрафторетилен.

РТА – розбірний теплообмінний апарат.

ЗАВДАННЯ І МЕТА РОБОТИ

Завдання: дослідити механізм процесу конденсації на різних металевих поверхнях в присутності сучасних поверхнево-активних речовин, дослідити основні закономірності теплообміну для процесу конденсації при застосуванні поверхнево-активних речовин лінійки Гідроефект і Нанопротек в теплообмінних апаратах.

Мета: проведення дослідження теплообміну і механізму процесу конденсації на різних поверхнях із застосуванням новітніх поверхневих-активних речовин в теплообмінних апаратах.

ВСТУП

Протягом багатьох років дослідження механізму і теплообміну процесу конденсації викликає широкий інтерес науковців і інженерів-практиків у всьому світі.

Дослідження у цій області мають за мету розробити більш сучасні теплообмінні апарати, або адаптувати вже існуючі для якісно нових систем тепlopостачання. Такі апарати і системи можуть мати компактні масогабаритні характеристики і повинні забезпечувати вищу швидкість теплообмінних процесів, бути економічними і ефективними.

Трубні і пластинчасті теплообмінні поверхні є найбільш технологічними з погляду їх застосування в промисловості. Використання поверхнево-активних речовин для процесу конденсації дозволяє варіювати режими від плівкового до краплинного і навпаки. При цьому, з мінімумом затрат просто і надійно інтенсифікується теплообмін. Якщо порівняти орієнтацію теплообмінних поверхонь в просторі, то горизонтально трубні апарати мають ряд переваг порівняно з їх вертикальним розташуванням.

За допомогою окремих дослідних ділянок, які створені для моделювання процесу конденсації, можна отримувати результати, які потім переносяться на роботу реальних теплообмінних апаратів. Порівняння результатів для лабораторних, напівпромислових і промислових дослідних теплообмінників вказують на певні особливості практичного застосування поверхнево-активних речовин (ПАР).

Дослідження різноманітних факторів, пов'язаних із застосуванням сучасних ПАР дозволяють впритул підійти до створення супергідрофобних і супергідрофільних поверхонь в теплообміні. Одним із практичних виходів задач даної тематики є тривала підтримка режиму краплинної конденсації і надійний захист теплообмінних поверхонь від впливу корозійно-ерозійних процесів.

1. СУЧАСНИЙ СТАН ПРОБЛЕМИ ВИКОРИСТАННЯ ПОВЕРХНЕВО-АКТИВНИХ РЕЧОВИН В ТЕПЛОБМІННИХ АПАРАТАХ

1.1 Стан проблеми

Вперше задачу теплообміну при ламінарній плівковій конденсації нерухомої пари вирішив німецький вчений В. Нуссельт ще 1916 році [1], краплинної конденсації – Й. Якоб [2], широкого розголосу набули подібні роботи в другій половині 20 ст. завдячуючи В.П. Ісаченко [3] і Дж. Роузу [4]. Всі задачі вище згаданих вчених зібрали в книзі „Тепломасообмін“, Н.М. Басова [5]. В 21 ст. дослідники наблизились в притул до розгадки створення супер гідрофобних і супер гідрофільних поверхонь з явищами наднезмочуваності і повного змочування робочих поверхонь. Під час конденсації, витрати теплоти змінюються вдовж плівки, нехтуючи переохолодженням конденсату температури насичення. Саме конденсація є ключем до світового виробництва електроенергії і чистої води в наш час. Підвищення ефективності має глобальний вплив на використання енергії. Цінність удосконалення дослідження для теплоенергетики, є речовин, що забезпечують гідрофобність поверхні.

У складних промислових умовах більшість водовідштовхуючих поверхонь мають короткий термін дії. Новий підхід до гідрофобного покриття повинен подолати цю проблему, стверджують дослідники Массачусетського технологічного інституту. Висновки були опублікованими в Журналі «Advanced Materials» 2013р. професором МТІ Карен Глісон і Кріпом Варанасі [6].

Однією з переваг нового покриття є те, що воно може бути надзвичайно тонким, всього одна тисячна товщини звичайного гідрофобного покриття. Це означає, що на інші властивості нової поверхні, такі як її електрична і тепла провідність, практично не впливає.

Нова активізація досліджень застосування сучасних ПАР в теплообмінниках, виникла вже в 20х роках 21 століття. Розширилась номенклатура можливостей, які надає сучасна хімія поверхневих процесів. Стосовно режиму краплинної конденсації

особливу цікавість викликає явище „стрибаючих„ або „танцюючих„ краплин. Така характерна особливість механізму безпосередньо пов'язана з отриманням супергідрофобної поверхні. Відмічено, що подібні явища можуть виникати при крайових кутах змочування не менше 148°.

Видалення конденсатних утворень з теплообмінної поверхні в першу чергу пов'язано з дією сили тяжіння. Наявність можливостей виникнення „стрибаючих„ або „танцюючих„ краплин, дозволяє більш ефективно видаляти конденсат з поверхні теплообміну [7]. Застосування сучасних ПАР дозволяють отримати на моно- і полімолекулярному рівні технологічні покриття робочих поверхонь. Завдячуючи сучасним передовим технологіям на поверхнях теплообміну утворюються мікро і наноструктуровані покриття. Ці покриття отримуються на основі певних сполук, які повинні нести в собі неорганічні хімічні елементи, такі як: кремній, сірка тощо. Робочі поверхні можуть оброблятися, наприклад, методами мокрого, вологого чи сухого травлення [8]. Як правило, покриття які здатні утворювати, так званий частокіл Ленгмюра, при сучасних методами мокрого травлення, використовують кремнієві нанодропи. Така технологія на нанорівні призводить до створення вирівняного по вертикалі частоколу [9]. Подібне покриття впливає на поверхневий натяг конденсатних утворень.

В процесі синтезу покриття не виключено, що природним чином можуть виникати мікродфекти. Для мікродфектів характерним є утворення кластерів, де розташування кремнієвих нанодропиків може бути більш або менш щільним [10].

Форма нанодропів може розглядатися при великій кратності збільшення або як циліндрична, або як конічна. Конічна форма є більш сприятливою для утворення високомобільних краплин. На мобільність краплин впливає тиск Лапласа, схематичне зображення процесу наведено на рисунку 1.1а [11].

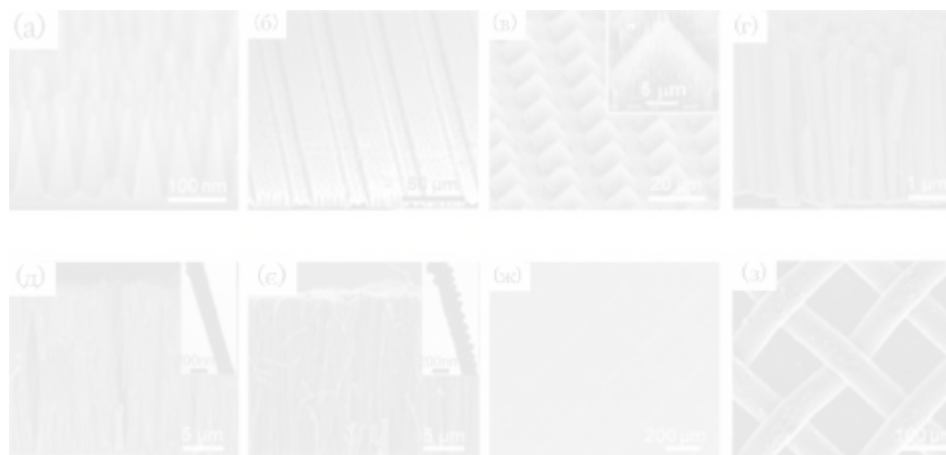


Рисунок 1.1 Мікро-/наноструктуровані поверхні отриманні з використанням сучасних ПАР: а - конічні кремнієві нанодроти; б - кремнієві нанодроти з мікропазами; в - мікропіраміди, покриті кремнієвими нанодротоми; г - нанодроти з використанням золота; д - близько розташовані мідні нанодроти; е - тривимірні мережі мідних нанодротів; ж - ієрархічна поверхня з масивами мідних нанодротів з мікропорами; з - ієрархічна структура з мідною сіткою.

Щоб задовольнити потребу в декількох масштабах довжини нанодротів для маніпулювання зростанням крапель, більш-менш регулярних мікро-шаблонів і наноструктур [12]. Як приклад, на рисунку 1.1б розглядається ієрархічна поверхня з паралельними мікроканавками. Масиви кремнієвих нанодротів різних типу розмірів можуть бути описані певною геометричною моделлю [13, 14]. На рисунку 1.1в розглянута ієрархічна поверхня, що складається з мікропірамід, утворених кремнієвими нанодротоми [15]. Окрім ПАР, які містять атоми кремнію та сірки відоме застосування коштовних металів, наприклад, золота. Для сучасних технологій утворення не змочуваних поверхонь, характерна є спроба отримання нанодротів на основі золота на рисунку 1.1г [16].

Нанесення покриття методом електрохімічного осадження здійснюється в два етапи. Поетапний підхід дозволяє створювати і підтримувати певні модельні шаблони. Але до кінця не з'ясовано який шаблон є максимально ефективним. Слід

констатувати, що не виключено отримання вельми специфічних умов змочування або не змочування робочих поверхонь змальовано на рисунку 1.1д [10]. Щоб запобігти утворенню мікрodefektів були виготовлені з використанням 3D пористих анодних шаблонів оксиду алюмінію показано на рисунку 1.1є [17]. На рисунку 1.1ж показано ієрархічну поверхню з масивами мідних нанодротів з мікросхемами [18].

Крім того, комерційні металеві матеріали, такі як мідна сітка, пінопласт і частинки, були застосовані для розробки недорогих супергідрофобних поверхонь і забезпечення рішення для широкомасштабного покращення поверхонь тепловіддачі в різноманітному діапазоні технологій на рисунку 1.1з [19].

Всі вище згадані підходи впливають на характер контакту конденсатних утворень з покриттям. Тому гостро постає питання оптимізації, як процесу отримання покриття, так і організації на ньому конденсації пари. Врешті-решт, контактний кут (конденсатне утворення з поверхнею), буде впливати на характер зародження і видалення конденсату, і на функцію розподілу за геометричними розмірами. Швидкість утворення первинних конденсатних утворень здатна зростати, що відповідає класичній теорії нуклеації.

1.2 Способи отримання краплинної конденсації

У 2007 році німецький вчений, професор, д.т.н. Альфред Ляйпертц (Alfred Leipertz), описує дослідження краплинної конденсації водяної пари із застосуванням імплантації іонів на різних матеріалах [20].

З часом, в отриманій за такою технологією на гідрофобних поверхнях концентрація впроваджених іонів зменшується, але при цьому спостерігався на протязі чотирьох років стійкий режим краплинної конденсації (рисунок 1.2). Розроблена технологія отримання гідрофобної поверхні має недолік: через невелику енергію плазми при обробці великих за площею теплообмінних поверхонь досягається мала глибина проникнення впроваджуваних іонів в поверхню що обробляється.



Рисунок 1.2 Візуалізація краплинної конденсації на металевих дисках 50мм діаметром: а) на початку роботи обладнання; б) після 70 годин; в) після 160 годин.

Для покращення водовідштовхувальних властивостей покриттів, тобто досягнення ефекту супер гідрофобності, створюються наноструктуровані поверхні, які потім покриваються фтор місткою гідрофобною речовиною [21,22].

Експериментальна установка для отримання оптичного зображення краплин і подальшого визначення крайових кутів і контактних діаметрів була описана в роботі Л.Б. Бойновіч, А.М. Емельяненко та ін [23].

Одним із способів отримання дисульфідів є реакція бромпохідних з тіосульфатів натрію за допомогою солі Бунте .

Наступним етап є нанесення отриманих дисульфідів на мідьвімісні пластинки і трубки. Дисульфід наносили на зразки, які перебували в спеціальній установці перебували в середовищі пара- дисульфід - трихлороцтова кислота. Для того, щоб можна було кількісно оцінити, про наявність захисного покриття необхідно було визначити кут змочування на поверхні.

Дані ІЧ-спектроскопії підтвердили наявність органометалевої структури, що вказує на хемосорбцію органічного залишку на частинках міді.

В 2015 році професор Альфред Ляйперц [24] зробив опис характеристики густини, поверхневий натяг і кінематична в'язкість гідрофтор-ефірів. Щільність рідини, кінематична в'язкість рідини та поверхневий натяг суміші розділених

гідрофтор-ефірів досліджували залежність від температури при умовах насичення. Для вимірювання густини насиченої рідини використовували вібротрубний щільномір. Кінематична в'язкість рідкої фази та поверхневий натяг, визначалися із застосуванням метода вимірювання поверхневого світлорозсіювання. Виміряні данні можна співвіднести в межах їхньої розширеної невизначеності шляхом інтерполяції.

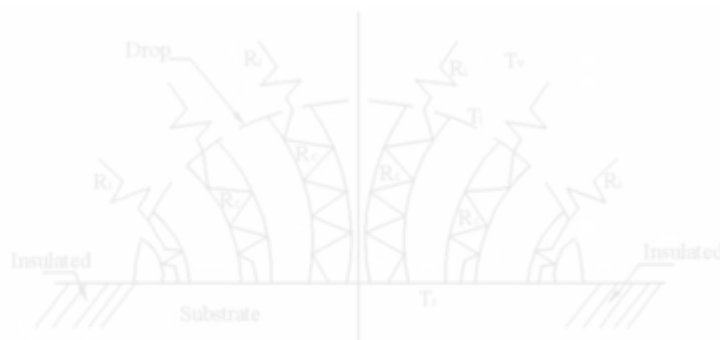


Рисунок 1.3 Розподіл термічного опору в краплині

Було відзначено, що аналітичне рішення системи диференціальних рівнянь є складним і важким. Таким чином, Хасан Фемі Текін дослідження системи диференціальних рівнянь не наводить. Загальний опір може бути знайдено з підсумовуванням цих опорів (рисунок 1.3).

2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ СТЕНДИ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Опис дослідного модуля на базі кожухотрубного ТОА

Схема дослідного модуля для дослідження процесу краплинної конденсації, як в умовах теплообмінного апарата на гідрофобних поверхнях (рисунок. 2.1.)

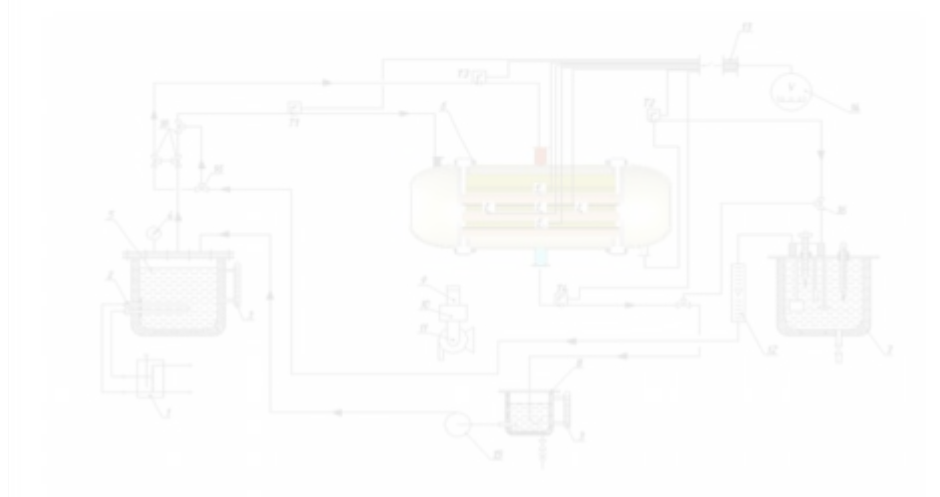


Рисунок 2.1 Схема дослідного модуля:

1-лабораторний автотрансформатор типу РНО-250-2А; 2-електронагрівач; гідростатичний рівнемір; 4-манометр; 5-електропаргогенератор; 6-візуально-дослідна ділянка; 7-термостат СМЖЛ-19/2,5-Ц; 8-конденсатозбірник; 9-оптична система мікроскопа; 10-з'єднувальний тубус; 11-фотокамера; 12-ротаметр; 13-точковий перемикач; 14-цифровий вольтметр А565-002-01; 15-насос; 16-трьох-ходовий кран

Візуально ділянка кожухотрубного теплообмінника показана на рисунку 2.2



Рисунок 2.2 Комп'ютерна модель кожухотрубного апарату

Дослідний модуль на рисунку 2.1 складається з двох контурів: гріючого парового та охолоджуючого водяного контурів.

Паровий (головний) контур складається з наступних елементів: 5–електропарогенератор; 6–візуально-дослідна ділянка; 8–конденсатозбірник; 9–оптична система мікроскопа; 10–з'єднувальний тубус; 11–фотокамера, 15–насос.

Замкнений водяний контур (по воді охолодження) з примусовою системою охолодження містить: 6–візуально-дослідну ділянку; 7–термостат СЖМЛ-19/2,5-11; 12–ротаметр.

В середині ділянки головного контура є функція для дослідження краплинної конденсації. Водяна пара, що генерувалась електропарогенератором 5, конденсувалась на ділянці 6. Регулювання потужності, що підводилась до електронагрівника 2 електропарогенератора 5 відбувалось за допомогою лабораторного автотрансформатора 1, таким чином можливо було керувати витратою пари. Конденсат після ділянки 6 збирався в конденсатозбірник 8, потім насосом 15 перекачувався у електропарогенератор 5. Робота установки передбачає виконання роботи по закритому та відкритому контуру. У випадку, якщо робота відбувалась по закритому контуру, то передбачалась лінія подачі води з конденсатозбірника 8 в електропарогенератор 5 з використанням осьового насоса „Світязь-15” (див. рисунок 2.1). Якщо робота здійснювалась по відкритому контуру, то подача води

здійснювалась з існуючої системи господарсько-питного водопостачання будівлі корпусу №5, це дозволило регулювати витрату охолоджуючої води.

Парогенератор 5 (рис.2.1) складається з: 2 – електронагрівача потужністю 1.5кВт; 3 – гідростатичного рівнеміра, який показує рівень води в парогенераторі; 4 – манометра, який необхідний для визначення тиску пари.

Система візуального спостереження парового контуру містить в собі підсвічувальний прилад (поз.9 рис.2.1), цифрові фото або відео камери 11.

Відвід теплоти від теплообмінної поверхні забезпечує водяний контур. Охолоджуюча вода прокачувалась вбудованим насосом в калорифер по замкнутому контуру: калорифер 7 – ротаметр 12 – ділянка 6 (рис.2.1). При необхідності вода в термостаті підігрівалась вбудованим нагрівачем. Підігрів води до температури заданої ртутним термометром з магнітним кільцем відбувався блоком нагріву. Температура нагрітої води контролювалась ртутним термометром. Рівномірність температури води в термостаті досягалась перемішуванням за допомогою вбудованої мішалки.

2.2 Опис візуально-експериментальної ділянки на базі кожухотрубного апарату

Для дослідного стенду було передбачено можливість зміни візуально-дослідних ділянок 6 (рисунок 2.1), що дає змогу проводити досліди на різних апаратах.

Схема візуально - експериментальної ділянки для дослідження процесу на зовнішній поверхні труби представлена на рисунку 2.2.

Основним елементом візуально-дослідної ділянки є горизонтальний кожухотрубний розбірний теплообмінник, оснащений засобами візуалізації. Поверхня теплообміну являє собою шаховий трубний пучок із семи мідних труб довжиною 300 мм кожна і зовнішнім діаметром 28 мм. Відносні поздовжній і поперечний кроки пучка склали $S_1/d=S_2/d=2,35$.

Для визначення температури поверхні конденсації в них заставлялося від 5 до 20 хромель-копелевих термопар (див. рис.2.3), виготовлених із дроту діаметром 0,15мм.

Для встановлення термопар на поверхні труби були зроблені канавки глибиною 0,5 мм і шириною 1 мм. По довжині канавки на відстані 25мм друг від друга під корольки термопар в свердлились отвори діаметром 1мм. У канавки укладалися проведені термопари, а корольки встановлювалися в отвори. Корольки термопар були закладені на відстані від 0,2 мм і більше від поверхні конденсації.

Визначення температури поверхні трубки з боку конденсації пари вироблялося з урахуванням глибини закладення термопар. Середнє значення температури стінки ($t_{ст}$) визначалося як середнє арифметичне всіх показань.

Величина витрати конденсату вимірювалась у кубічних метрах. Кількість теплоти розраховувалась на основі витрати конденсату. Витрата охолоджуючої води вимірювалась за допомогою спеціальної мембрани.

Схема закладання термопар для візуально-дослідної ділянки для дослідження процесу на зовнішній поверхні трубок приведена рисунку 2.3.



Рисунок 2.3 Схема закладання термопар для візуально-дослідної ділянки теплообмінника типу «трубка в трубці»

Спостереження за процесом конденсації на зовнішній поверхні труби велось через спеціально вмонтовані оглядові вікна.

2.3 Опис інших варіантів дослідних установок

Так як дослідним стендом було передбачена можливість заміни ділянки б, що в свою чергу дає змогу проводити досліди на різних апаратах, також можна спостерігати конденсацію в реальному часі. Базовим елементом ділянки є латунна трубка довжиною 300 мм і зовнішнім діаметром 30 мм.

Для визначення температури поверхні конденсації в них заставлялося від 5 до 20 хромель - копелевих термопар (див. рис.2.3), виготовлених із дроту діаметром 0,15мм.

Також опис візуально - експериментальної ділянки може бути на базі металевих дисків. Зразки дисків виконувались з різних матеріалів (рисунок 2.4)

Така конструкція поверхонь дозволяє оперативно відпрацьовувати кількісно-якісні характеристики захисного гідрофобного покриття . Можна було застосовувати візуалізацію процесу за допомогою мікроскопа.



а) б) в) г) д) е)

Рисунок 2.4 Металеві диски з різних матеріалів: а) Нержавіюча сталь 1Х18Н10Т; б) МНЖ 5,1; в) Латунь Л68; г) Дюралюміній з добавками АЦ; д) Мідь М1; е) Мельхіор.

Спосіб обробки конденсаційної поверхні й методика виміру температури стінки температур плоскої поверхні аналогічні способу обробки і методиці виміру горизонтальної трубки.

Дослідні поверхні представляють собою диски діаметром 50мм і товщиною від 2 до 5мм. Поверхню було оброблено мастилом на основі тефлону і речовини WD-40.

Термін дії таких покриттів склав до 5 років [25]. Також розглядалася можливість поверхонь сучасними речовинами Нанопротек Антикор, Нанопротек Анतिकорозіон та Нанопротек Електрик.

2.4 Экспериментальный коэффициент тепловіддачі при конденсації

Експериментальний коефіцієнт тепловіддачі визначався із закону Ньютона-Ріхмана:

$$\alpha = \frac{q}{T_{\text{нас}} - T_{\text{ст}}}, \quad (2-1)$$

де, q – щільність теплового потоку, Вт/м²;

$T_{\text{нас}}$ – температура насичення, К;

$T_{\text{ст}}$ – температура стінки, К.

Щільність теплового потоку з боку пари в дослідженнях знаходили, знаючи кількість тепла, переданого охолоджуючій рідині парою, що конденсується, через теплообмінну поверхню F :

$$Q = m_n \cdot r + m_n \cdot C_p \cdot (t_n - t_k), \quad (2-2)$$

де, Q - тепловий потік, Вт;

m_n - масова витрата пари, кг/с;

C_p - питома теплоємність пари, $\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$;

t_n - температура пари, °С;

t_k - температура конденсату, °С;

r - теплота пароутворення, кДж/кг.

Щільність теплового потоку з боку води знаходили по залежності

$$Q = m \cdot C_p \cdot (T_2 - T_1), \quad (2-3)$$

де, m - масова витрата охолоджуючої рідини, кг/с;

C_p – масова ізобарна теплоємність рідини, кДж/(кг · К);

T_2, T_1 – різниця температур між виходом і входом охолоджуючої води, К.

Середня температура стінки поверхні конденсації визначалася як середня температура, знайдена за показниками термопар, закладених в експериментальній ділянці.

Температура поверхні стінки трубки визначалася по формулі:

$$t_{\text{ст}} = t \pm \frac{q}{\lambda} \cdot \frac{d}{2} \cdot \ln \frac{d_1}{d}, \quad (2-4)$$

де, $d=26\text{мм}$, $d_1=27\text{мм}$ – відповідно внутрішній діаметр труби й середній діаметр закладки термопар.

Так само для контролю визначався розрахунковий коефіцієнт тепловіддачі з боку води. Цей коефіцієнт визначався залежно від режиму плинну робочого тіла по відомих емпіричних залежностях.

Для полегшення обробки великого масиву даних була розроблена прикладна програма, що дозволяє по заданим експериментальним даним робити розрахунок коефіцієнтів тепловіддачі для всіх візуально-експериментальних ділянок.

2.5 Гідрофобізація теплообмінної поверхні та її нанесення

На сьогодні метод гідрофобізації теплообмінної поверхні з метою отримання краплинного режиму конденсації є одним з найбільш ефективних способів інтенсифікації теплообміну.

Виходячи з отриманих пробних результатів, в якості гідрофобізатора був обраний спрій типу Нанопротек, які наносилися під тиском і утворювали надійну захисну оболонку поверхні від окиснення на мономолекулярному рівні.

На даний момент відомо близько сорока різних речовин, які стимулюють утворення краплинної конденсації.

При проведенні дослідження використовуються різноманітні гідрофобізатори, (ці речовини виробництва Польщі, Німеччини, України) заздалегідь герметично закрити в ємностях під певним тиском і розфасовані.

Використовуючи їх необхідно дотримуватись правил безпеки поводження з хімічними речовинами. Перед виконанням робіт керівники проводять інструктаж і забезпечують контроль виконання. Щоб уникнути травм, рухи руками здійснювати обережно, неспішно, зверху вниз уздовж конструктивних елементів теплообмінних апаратів. З метою виключення опіків поверхня, яка обробляється, не повинна бути нагрітою. Наносити поверхнево-активні речовини необхідно на відкритому повітрі, або в добре вентильованому приміщенні. Робоче місце на відкритому повітрі повинне знаходитися з підвітряного боку.

При нанесенні аерозолів на теплообмінні поверхні балон тримати вертикально на відстані 25...35 см, при цьому необхідно уникати попадання аерозолу на шкіру, в очі і органи дихання. У разі забруднення рук поверхнево-активними з'єднаннями необхідно протерти їх ватяним тампоном, після чого ретельно вимити водою з милом. На робочих місцях не допускати падіння балонів. При використанні аерозолів необхідно дотримуватися заходів пожежної безпеки.

Після використання балони не розкривати і не спалювати. Засобу індивідуального захисту: халат і рукавички з бавовняної тканини. Всі роботи з підготовки поверхонь теплообмінника і нанесенні покриттів виконувати в рукавичках і з використанням засобів індивідуального захисту. Кваліфікаційні вимоги: до робіт допускаються персони, які досягли 18 років, знають безпечні методи роботи і ознайомлені з інструкцією по застосуванню конкретних речовин.

Вище зазначені правила безпеки поведінки під час проведення експерименту дозволяють просто і безпечно використовувати поверхнево активні речовини для утворення конденсації.

2.6 Дослідження механізму краплинної конденсації

Механізм краплинної конденсації водяної пари на обробленій поверхні вивчався на візуальній ділянці (поз. 6 рис.2.1) за допомогою оптичної системи (поз.9-11 рис.2.1). Для різних режимів руху теплоносія проводилась фото й відео зйомка всіх стадій процесу краплинної конденсації. Досить широке вікно дозволяло підсвічувати картину процесу звичайним джерелом світла потужністю 75 Вт.

За допомогою відеокамери виконувалася безперервна відео зйомка краплинної конденсації. Фотозйомка вироблялася дискретно через фіксовані проміжки часу. Змінюючи кратність збільшення зображення, велися спостереження за поведінкою краплин розмірами від найменших видимих в 1-3 мкм до, що видаляють із теплообмінної поверхні, діаметрами в 2-3 мм.

Отримані фотознімки й по кадрах обробка відеоматеріалу дозволяла визначати форму й розміри краплин, а також їхню кількість, що припадає на одиницю поверхні конденсації, крім того, можна було судити про стан теплообмінної поверхні.

Оскільки при вивченні досить складного процесу краплинної конденсації в літературі зустрічається досить мало відомостей, то дотепер ще не створена універсальна й повна теорія розрахунку тепловіддачі при краплинній конденсації.

Для розрахунку середньої тепловіддачі процесу необхідне знання розподілу краплини по розмірах і розрахунок передачі тепла через одиничні краплини різних розмірів. Для визначення кількості краплини того або іншого розміру, що доводиться на одиницю поверхні теплообміну, можна використати функцію розподілу краплини по розмірах:

$$\varphi(R) = \lim_{\Delta R \rightarrow 0} \frac{\Delta n(R)}{\Delta R}, \quad (2.5)$$

де $\Delta n(R)$ - загальна кількість краплин, що мають значення радіусів у заданому інтервалі ΔR , що припадає на одиницю площі поверхні конденсації.

У всьому спектрі розмірів краплини від зародкового $R_{кр}$ до відривного $R_{відр}$ виділяється ряд класів [26] з інтервалами ΔR_i , для яких характерні певні швидкості росту, час існування, середній розмір і коефіцієнт тепловіддачі. Кожен краплинний клас може мати свої характерні властивості. Так, первинні мікроскопічні краплини збільшуються шляхом прямої конденсації й злиття, а їхнє число залежить від загальної вільної площі. У діапазоні розмірів краплини, ріст яких контролюється їхнім злиттям, розподіл краплин практично не залежить від параметрів поверхні. На кількість краплин відривного радіуса у свою чергу впливають орієнтація, форма й шорсткість теплообмінної поверхні, сила ваги, умови взаємодії на поверхнях розділу рідина-стінка-пара, а також швидкість випару. Краплини кожного класу оточені меншими по розмірах краплями й перебувають від них у динамічній залежності.

Знаючи функцію розподілу краплини по розмірах $\varphi(R)$, легко розрахувати для різних класів кількість краплини на одиницю площі Δn_i і частку поверхні теплообміну, займану ними:

$$(S_k \cdot \Delta n)_i = \int_{R_{min}}^{R_{max}} \varphi(R_k) dR_k, \quad (2.6)$$

де R_{min} й R_{max} – мінімальний і максимальний розміри, що визначають даний клас краплин; S_k – площа краплин, м².

Зробивши підсумовування по всіх класах краплин, за умови, що $R_{кр}$ прямує до нуля, одержимо:

$$S_k \cdot \Delta n = \int_{R_{кр}}^{R_{от}} \phi(R_k) dR_k \rightarrow 1. \quad (2.7)$$

Краплини з радіусами в діапазоні від $R_{кр}$ до $R_{відр}$ займають практично всю теплообмінну поверхню.

Отже, маючи максимальну інформацію і досить повний опис краплинної конденсації, і використовуючи модель теплопровідності через одиничні краплини [27-29], можна розрахувати середню тепловіддачу процесу.

3. ОСНОВНІ ЗАКОНОМІРНОСТІ МЕХАНІЗМУ ПРОЦЕСУ КОНДЕНСАЦІЇ.

3.1 Крайовий кут змочування

Поверхневі властивості, обумовлені багато в чому способом гідро- або ліофобізації, та проявляються за допомогою крайового кута змочування.

На форму конденсаційних утворень впливає їхня маса, умови контакту з поверхнею (контактний кут) і її стан.

Початкова стадія краплинної конденсації характеризується яскраво вираженою сферичністю краплин. Чим вище сферичність, тим менша площа контакту краплин з поверхнею і тим інтенсивніше відбувається їхній рух по поверхні. На рисунку 3.1 зображено два випадки існування сферичних краплин на гідрофобній поверхні.

Форма відривних краплин може відрізнятися від сферичної внаслідок зміни балансу сил поверхневого натягу між рідиною, паром і конденсаційною поверхнею.

Для швидкоплинних початкових стадій процесу поза залежністю від форми й орієнтації поверхні в просторі значення контактного кута краплини прямують до величини крайового кута змочування для умов рівноваги.



Рисунок 3.1 Сферичні краплини на плоскій гідрофобній поверхні: а) менша сферичність краплини; б) більша сферичність краплини.

Крайовий кут визначається балансом енергії (поверхневих натягів) на межі розділу між твердою, рідкою й газоподібною фазами. При дії сили гравітації на краплину, що перебуває на вертикальній або похилій поверхні, виникає різниця між кутами натікання й відтікання.

Відривний діаметр краплини на плоскій вертикальній пластині наближено можна обчислити скориставшись співвідношенням запропонованим :

$$D_{\text{від}} \approx \frac{1}{g}, \quad (3-1)$$

де g – коефіцієнт прискорення вільного падіння, $\frac{M}{c^2}$.

У випадку горизонтальної труби картина існування і видалення краплини носить аналогічний характер (див. рис. 3.1).

Як видно з рисунку 3.2 відривний діаметр по рекомендаціям можна наближено обчислити за таким співвідношенням :

$$D_{\text{від}} \approx \frac{1}{g \cos \psi}. \quad (3-2)$$

Вимірявши на збільшеній фотографії діаметр D_k і висоту H_k краплини, контактний кут визначається зі співвідношення (рис. 3.2):

$$\theta = \frac{\pi}{2} + \arcsin \left(\frac{2 \cdot H_k}{D_k} - 1 \right). \quad (3-3)$$

Контроль виміру висоти для нерухомої або повільно зростаючої краплини здійснювався за допомогою фотокамери. Фокусування послідовно проводилося на поверхню конденсації, а потім на поверхню краплини. Розрахунок відривного діаметра дещо ускладнюється тим, що в кожній частині поверхні труби може існувати лише краплина відповідного розміру, як це показано на рис. 3.2.

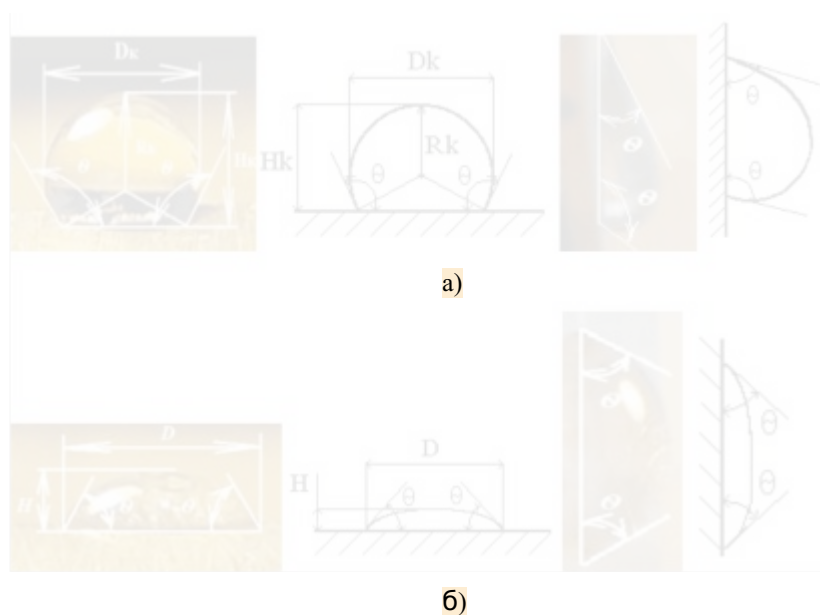


Рисунок 3.2 Форма краплини відповідно до гідрофобності поверхні: а) гідрофобна поверхня; б) – гідрофільна поверхня

Для спрощення задачі визначення відривного діаметра краплини доцільно розбити поверхню горизонтальної труби на чотири області. Розглянемо як веде себе крапля в першій області, для цього можна розділити I область на десять інтервалів через кожні 9° починаючи від умовного нуля, як це було запропоновано в (див. рис.3.2).

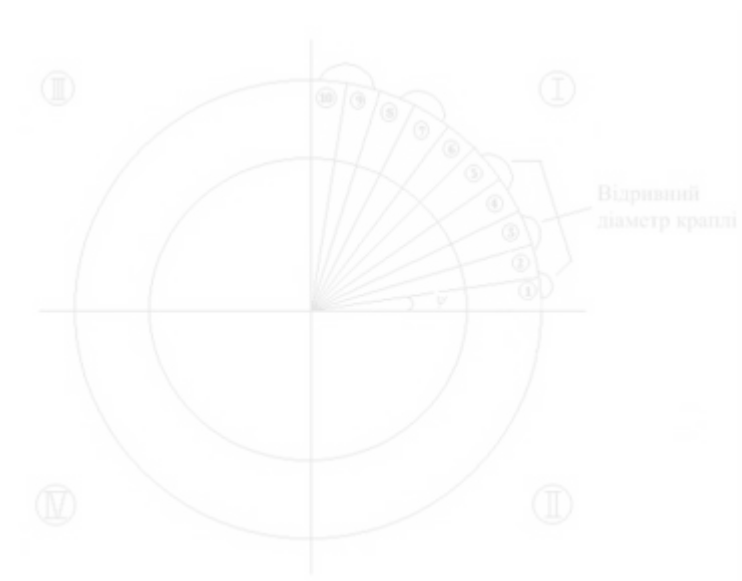


Рисунок 3.3 Інтервали існування різних діаметрів краплин на горизонтальній трубі

Для відносно “малих” краплин $R_k < 50$ мкм різницею між кутами натікання й відтікання можна знехтувати через її незначність. Краплина в цьому випадку буде мати форму сферичного сегмента (рис.3.3).

Контактний кут вимірявся при проведенні експериментів на плоскій вимірювально-візуальній ділянці. Конструкція експериментального конденсатора була виконана з урахуванням можливості досягнення максимальної кратності зображення.

Для відносно “малих” краплин $R_k < 50$ мкм різницею між кутами натікання й відтікання можна знехтувати через її незначність. Краплина в цьому випадку буде мати форму сферичного сегмента.

Контактний кут вимірявся при проведенні експериментів на плоскій вимірювально-візуальній ділянці. Конструкція експериментального конденсатора була виконана з урахуванням можливості досягнення максимальної кратності зображення.

3.2 Розподіл краплин за розмірами

Якщо розподіл краплин по поверхні відомо для конкретного процесу краплинної конденсації, то можна створити модель розрахунку середньої тепловіддачі для всієї поверхні, яка базується на теорії термічного опору окремих краплин радіуса R . До теперішнього моменту невідома універсальна формула для обрахунку розподілу краплин по поверхні. Найбільш зручно ця функція визначається, як:

$$N(R) = \lim_{\Delta R \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta N(R)}{\Delta R} \right), \quad (3-4)$$

де, загальна кількість краплин на одиницю площі ΔN розраховується для інтервалу радіусів краплин від $R-(\Delta R/2)$ до $R+(\Delta R/2)$.

Така функція дозволяє визначити кількість краплин на одиницю площі в заданому інтервалі їх радіусів. Експериментальна оцінка первинних краплин обмежується в наслідок їх швидкоплинного розвитку прямо до мікронного розміру. Дослідження умовного циклу краплинної конденсації дозволяє стверджувати, що в цьому випадку розподіл краплин не буде залежати від параметрів поверхні і буде майже універсальним. Однак можна розрахувати критичний радіус $R_{кр}$ за формулою (3-5).

$$R_{кр} = \frac{2\sigma_H}{r\rho(T_H - T_C)} \quad (3-5)$$

де σ – коефіцієнт поверхневого натягу, Н/м;

$T_{нас}$ – температура насичення, К;

r – питома теплота фазового переходу, кДж/кг;

ρ_p – щільність рідкої фази, кг/м³;

ΔT – температурний напір, К.



а)

б)

Рисунок 3.4 Конфігурація краплин:

а) схема, що відповідає реальній картині розвитку і злиттю краплин б) схема розташування і розвитку краплин за рівнобічним трикутником

Реальна картина розвитку краплин досить хаотична, і для неї важко застосовувати якісь алгоритми. Тому хаотичну схему спрощують до схеми рівнобічного трикутника, де відстань між краплинами мінімальна (Рисунок 3.4).

4. ТЕПЛООБМІН ПРИ КОНДЕНСАЦІЇ В ДОСЛІДНИХ АПАРАТАХ

4.1 Теплообмін на поверхні дослідного апарату типу «труба в трубі»

Дослідження краплинної конденсації відбувалося на трубці виготовленої з латуні зовнішнім діаметром 28 мм.

У якості гідрофобізатора використовувалися речовини типу Нанопротек Антикор і Нанопротек Анतिकорозіон. Якісна картина краплинної конденсації була отримана на всій теплообмінній поверхні (див. рисунок 4.1).

Дослідження проводилися при наступних значеннях режимних параметрів: температурний напір пара-стінка $\Delta t=(0.3...10)^{\circ}\text{C}$, швидкість парового потоку $W<1\text{м/с}$, щільність теплового потоку $q=(68000...108862)\text{Вт/м}^2$.

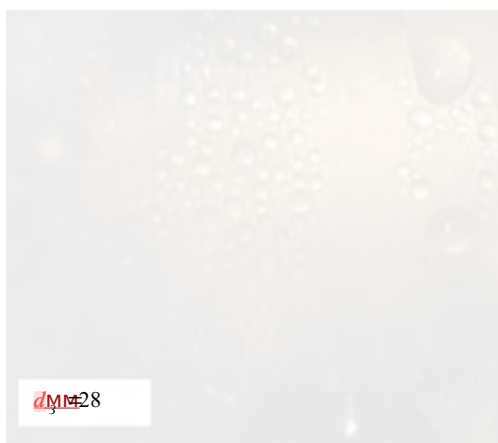


Рисунок 4.1 Краплинна конденсація на поверхні теплообмінника типу «Труба в трубі»

Досліди проводились на латунній трубці, тому що латунь досить міцно сприймає і утримує ПАР, зокрема Нанопротек Антикор і Нанопротек Анतिकорозіон утворювали надійну оболонку на мономолекулярному рівні, яка захищала поверхню теплообміну від окиснення.

Для контролю якості отриманої краплинної конденсації була здійснена візуалізація процесу із одночасною фото- та відеозйомкою.

При проведенні експерименту, було встановлено, що зі збільшенням температурного напору «пара-стінка» значення коефіцієнтів тепловіддачі α знижувалися. Зменшення тепловіддачі високо інтенсивного процесу пов'язане з виникненням на поверхні теплообміну відривних краплин час існування яких порівняно із часом циклу конденсації [30].

Аналізуючи залежності $\alpha=f(\Delta t)$, $q=f(\Delta t)$ (див. рис. 4.2, рис. 4.3) дійдемо висновку: коефіцієнт тепловіддачі α при краплинній конденсації зменшується зі збільшенням Δt , що не означає зменшення щільності теплового потоку (відповідно до закону Ньютона-Ріхмана).

Таким чином, для попередньо обробленої поверхні теплообміну отримана якісна краплинна конденсація. Отримані значення коефіцієнтів тепловіддачі при краплинній конденсації перевищують значення коефіцієнтів тепловіддачі для плівкової конденсації від до 3-4-х разів. Найкращий результат був отриманий для речовин Нанопротек Антикор.

Для наступних режимних параметрів було виконано узагальнення результатів дослідження:

- тиск пари $P=101,3$ кПа;
- швидкість парового потоку $W_{\text{п}} < 2$ м/с;
- температурний напір «пара-стінка» $\Delta t \in 0,3 \dots 10^0$;
- густина теплового потоку $q = 68 \dots 108$ кВт/м².

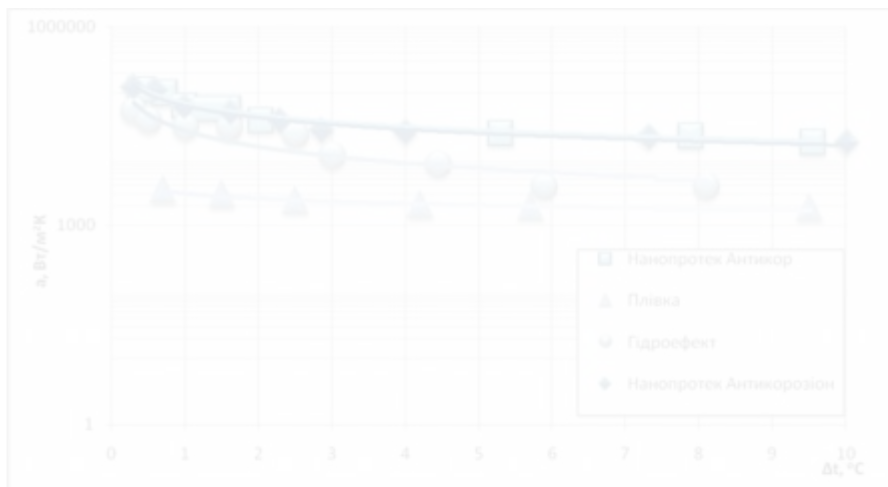


Рисунок 4.2 Представлення залежності коефіцієнта тепловіддачі від температурного напору $\alpha_p = f(\Delta t)$

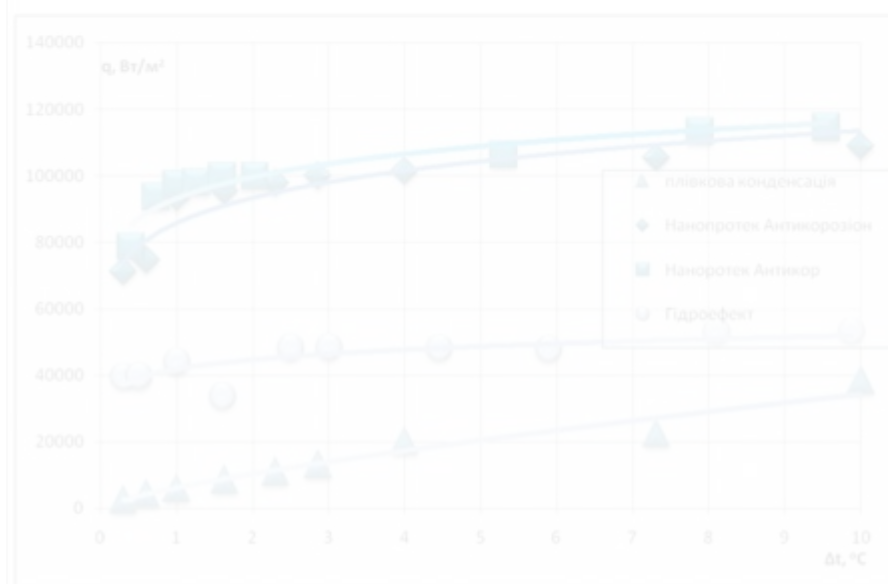


Рисунок 4.3 Представлення залежності густини теплового потоку від температурного напору $q = f(\Delta t)$ при використанні речовини $\Delta t, ^\circ\text{C}$

Найкращий результат був отриманий для речовин Нанопротек Антикор.

4.2 Розрахунок за візуальною картиною процесу краплинної конденсації

Краплини різних типорозмірів займають певні ділянки поверхні теплообміну і з часом змінюють своє місце розташування. Знаючи функцію розподілу краплини по розмірах, запропоновану в [31], визначивши частку поверхні теплообміну, що зайнята краплями різних класів $S_k \cdot \Delta l$ (рисунок 4.4), варто врахувати їх "час життя".

На підставі покадрової обробки відео- і фотоматеріалу проаналізуємо процес краплинної конденсації. Час видалення краплини з поверхні теплообміну $\tau_{\text{відр}}$ дуже малий в порівнянні з часом τ їхнього росту до $R_{\text{відр}}$, а на місці краплини, що сходить, миттєво утворюються нові зародкові краплини. Тому $\tau_{\text{відр}}$ не ввійшло в розрахунок загального часу циклу $\tau_{\text{ц}}$.

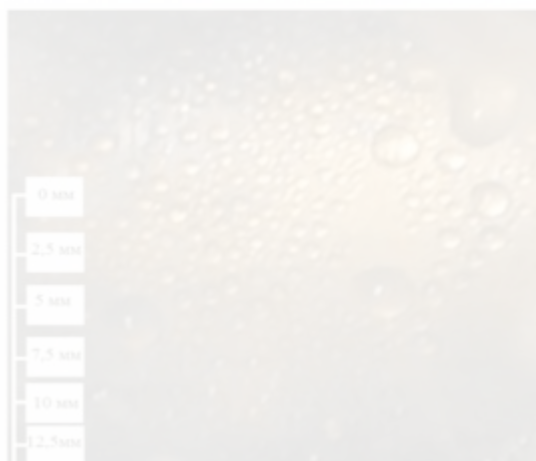


Рисунок 4.4 Оптичне збільшення теплообмінної поверхні

Використовуючи модель теплопровідності в краплини [17, 18], можна оцінити коефіцієнт тепловіддачі, характерний для того або іншого класу краплин де значення константи прийняте $C=1,5$ – для краплин, крайовий кут яких близький до 90° .

Згідно з даними автора [18], коефіцієнт $C=1$, якщо контактний кут краплини менше 50° , спостерігається автомоделна область (рисунок 4.1)

$$\alpha_{ki} = C \cdot \frac{\lambda_p}{R_i} \quad (4-1)$$

Зі збільшенням кута, збільшується значення константи. При $\Theta=50^\circ \dots 90^\circ$ константа пропорційності $C=1 \dots 1,5$, спостерігається краплинна і псевдо краплинна конденсація. При $\Theta=90^\circ \dots 157^\circ$ константа пропорційності $C=1,5 \dots 4$ - краплинна конденсація на гідрофобній і супергідрофобній поверхнях.



Рисунок 4.5 Залежність крайового кута Θ , від коефіцієнта C [18]

Зі збільшенням розмірів тепловіддача краплини зменшується, а час їх "життя" на поверхні теплообміну росте. Відносний час життя кожного з класів краплини визначалося по різниці значень часів, що відповідають граничним максимальному й мінімальному розмірам, що визначають даний клас краплин. Ця різниця відносилась до всього часу "циклу" краплинної конденсації:

$$\frac{\tau_i}{\tau_{\text{ц}}} = \frac{\tau_{\text{max}i} - \tau_{\text{min}i}}{\tau_{\text{ц}}} \quad (4-2)$$

Проведений аналіз дозволив розглянути основні фактори, що описують середню в часі і у просторі тепловіддачу при краплинній конденсації, тобто частку площі, займану краплями різних розмірів, відносний час їхнього життя й оцінку тепловіддачі різних класів краплини. За допомогою цих факторів побічно враховується і безліч інших, таких, наприклад, як частота утворення краплини, що враховується часовим фактором і ін.

Очевидно, що чим більше частка поверхні зайнята краплями певного класу, і чим вище їхній час життя, тим більше і внесок в інтенсивність процесу. Скористаємось безрозмірним комплексом A , запропонованим в [31]:

$$A = S_k \cdot \Delta n \cdot \left(\frac{\Delta \tau}{\tau_c} \right) \cdot \begin{pmatrix} \alpha_k \\ \alpha_{пл} \end{pmatrix}, \quad (4-3)$$

де $\alpha_{пл}$ – коефіцієнт тепловіддачі при плівковій конденсації для фіксованих ΔT , розрахований по формулі Нуссельта, для визначення внеску всіх класів краплин в загальну середню тепловіддачу процесу в цілому

У цілому ж наведена методика розрахунку середньої тепловіддачі при краплинній конденсації дозволяє досить точно описати експериментальні результати як для нерухомої пари, так і для пари що рухається.

З точки зору механізму процесу температурний напір між парою і поверхнею конденсації спричиняє спектр розмірів краплини від $R_{кр}$ до $R_{відр}$, який може існувати на теплообмінній поверхні. Краплям менших типорозмірів відповідають більш високі значення коефіцієнтів тепловіддачі.

З іншої сторони, на динаміку розвитку краплини впливають швидкість парового потоку, дія сили ваги і сил поверхневого натягу. При зростанні W_p знижуються значення $R_{відр}$, а отже, і маси краплин, що видаляються із теплообмінної поверхні. Міняється також і траєкторія сходу краплини, що захоплюються потоком пари. Краплини, що перебувають на поверхні, менших розмірів, створюють на ній

додаткову "шорсткість, що біжить,". У цьому випадку дотичне напруження на границі розділу фаз повинне зростати.

Чим менше розмір краплин, що відриваються, тим більший вплив вони відчувають на своєму шляху з боку інших краплин, що зметають їх. Тим самим підсилюється вплив зрушуючого зусилля пари на закономірності розвитку, злиття і видалення конденсаційних утворень. У результаті цього знижується час циклу краплинної конденсації і зменшується середній радіус краплин, що перебувають на теплообмінній поверхні.

4.3 Обробка даних теплообмінника типу «труба в трубі» та кожухотрубного ТОА

Була проведена обробка даних, отриманих на теплообміннику типу «трубка в трубці» і кожухотрубному теплообмінному апараті, з метою їх представлення у безрозмірному вигляді. Також розраховані значення чисел Nu та Re . Проведено представлення отриманих даних для дослідного апарату у вигляді залежності:

$$Nu = C \cdot Re^m \quad (4-5)$$

Переходячи до універсального безрозмірного опису процесу можна розширити діапазон застосування на інші випадки процесу конденсації.

4.4 Аналіз та узагальнення дослідних даних для поверхні пластинчастого ТОА

Дослідження краплинної конденсації також проводилися на пластинчастому теплообмінному апараті РТА-12 (див. рисунок 4.7).

Теплообмінна поверхня складається з чотирьох робочих гофрованих пластин з прокладками, які встановлюються в канавках (пазах) вздовж краю кожної пластини.

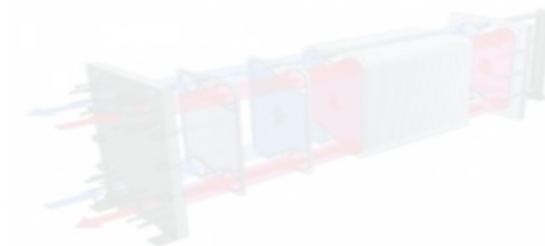


Рисунок 4.7 Пластинчатый теплообменный аппарат

У якості гідрофобізатора використовувався Гідроефект (після простою поверхні 2 роки) і Нанопротек Антикор та комплексна обробка поверхні. Картина краплинної конденсації була отримана на всій теплообмінній поверхні гофрованих пластин (див. рисунок 4.8).

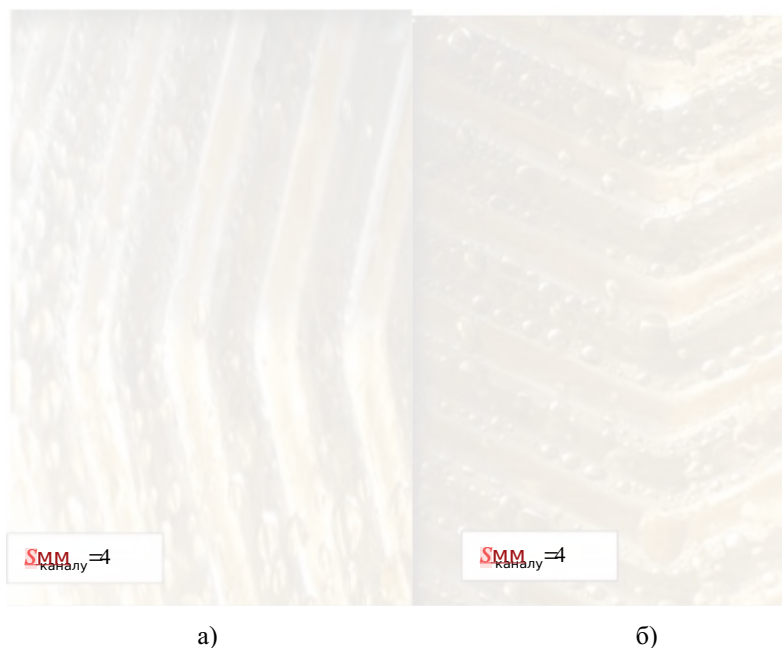


Рисунок 4.8 Картина якісної краплинної конденсації на теплообмінній поверхні: а – поверхня оброблена Гідроефектом; б – поверхня оброблена Нанопротек Антикор.

Дослідження проводилися при наступних значеннях режимних параметрів: температурний напір пара-стінка $\Delta t = (0,5 \dots 4)^\circ\text{C}$, швидкість парового потоку $W < 1 \text{ м/с}$, щільність теплового потоку $q = (215000 \dots 402000) \text{ Вт/м}^2$.

В результаті експериментальних даних при використанні Гідрофекту (після 2-х років простою) та Нанопротек Антикор були побудовані графіки залежності коефіцієнта тепловіддачі від температурного напору пара-стінка (рисунок 4.9), густини теплового потоку від температурного напору пара-стінка (рисунок 4.10) та порівняння з даними попередників.

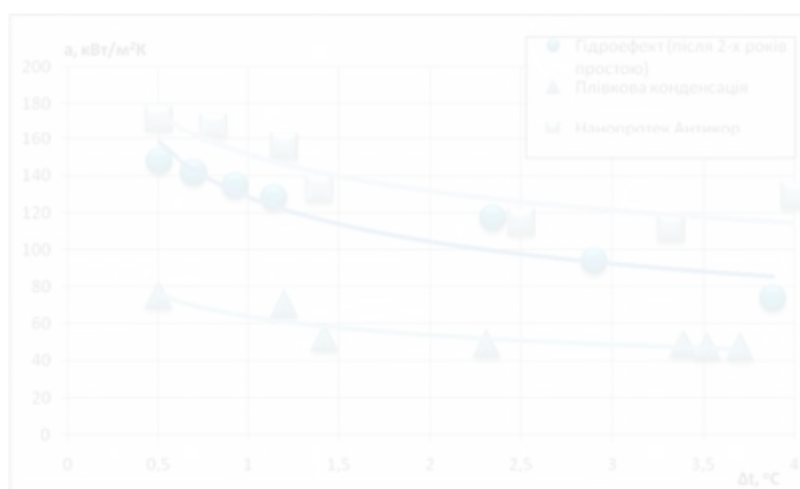


Рисунок 4.9 Представлення залежності коефіцієнта тепловіддачі від температурного напору $\alpha_{\text{п}} = f(\Delta t)$, отриманої при використанні речовини Гідрофект (після простою 2 роки), Нанопротек Антикор, для двох ходів по парі.

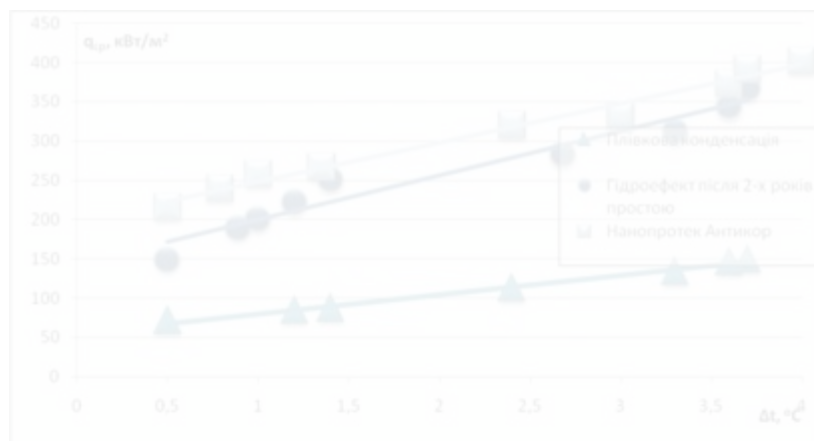


Рисунок 4.10 Представлення залежності густини теплового потоку від температурного напору $q = f(\Delta t)$ отриманої при використанні речовини Гідрофобізатор та Нанопротек Антикор для двох ходів по парі.

На підставі наведених експериментальних даних (див рис.4.9, 4.10) кращу інтенсивність процесу конденсації дає застосування речовин типу Нанопротек Антикор.

4.5 Обробка даних пластинчастого теплообмінного апарату

Аналогічно до кожухотрубного теплообмінника та теплообмінника типу «труба в трубі» дані представлені у безрозмірному вигляді. Результати розрахунків викладено на рис. 4.11 як залежність $\lg Nu = f(\lg Re_*)$. Значення констант C та показників ступеня m зведені в таблицю 4.1.

Таблиця 4.1 Значення коефіцієнтів C та m до формули (4-5)

Поверхня теплообміну	Гідрофобізатор	C	m
Нержавіюча сталь	Нанопротек Гідрофобізатор	-0,76	-7,09
Нержавіюча сталь	Нанопротек Антикор	-0,82	-7,33

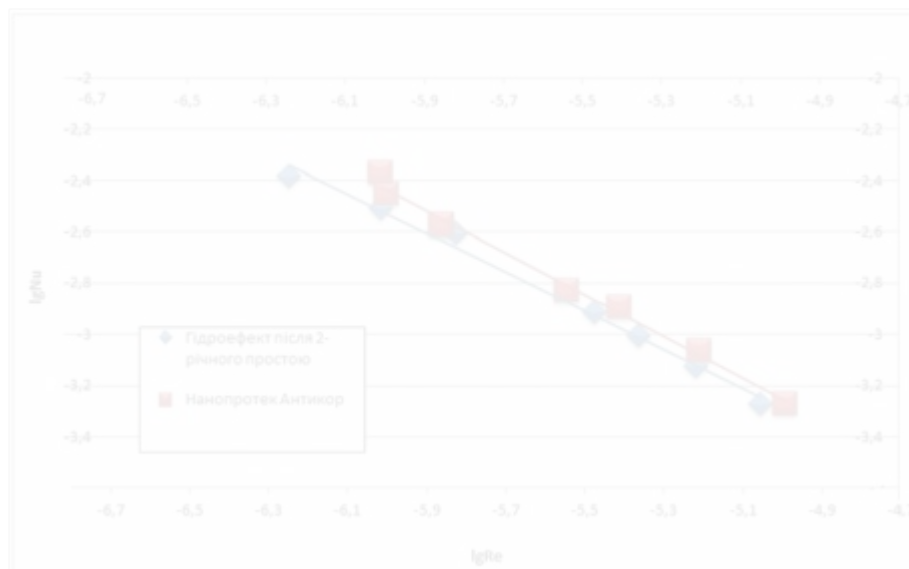


Рисунок 4.11 Представлення результатів у безрозмірному вигляді.

Наведені дані у безрозмірному вигляді дозволили універсалізувати узагальнення результатів застосування різних лінійок поверхнево активних речовин. Відхилення в описі даних відповідає допустимій похибці теплофізичного експерименту як для розмірного так і для безрозмірного представлення даних (дивись Додаток А).

ВИСНОВКИ

Ґрунтуючись на вище зазначеному проведеному літературному огляді дослідження краплинної конденсації можна зробити висновок, що основним положенням існують теорії, що характеризують процес конденсації, маємо за необхідність конкретизувати стосовно процесу на реальних установках. Недолік: не існує універсального розрахунку тепловіддачі при краплинній конденсації. Отже, використання сучасних поверхнево-активних речовин в теплообмінниках є комплексною задачею, яка потребує детального вивчення. Але при цьому надає вельми широкі перспективи створення надійних робочих поверхонь, в тому числі здатне поліпшувати відштовхувальні властивості покриття і забезпечує високу інтенсивність теплообміну.

Розглянувши, що для дослідження процесу конденсації ми можемо використовувати експериментальний стенди різні за конструкцією: на базі кожухотрубного ТОО, теплообмінника типу «труба в трубі», а також модифіковано і вдосконалено дослідний стенд на базі пластинчатого теплообмінного апарату. За даними методиками на розглянутих експериментальних стендах, маємо змогу провести теплотехнічні вимірювання, корегувати режимні параметри течії і розраховувати коефіцієнт тепловіддачі пари. Було проведено досліди на кожухотрубному, теплообміннику типу «труба в трубі» та пластинчатому теплообмінних апаратах. З досліду отримали вираш по тепловіддачі приблизно в 4 рази більше в порівнянні з плівковою конденсацією, а також одержані розрахункові емпіричні залежності для двох режимів.

У якості гідрофобізатора використовувалися речовини типу Нанопротек Антикор і Нанопротек Анतिकорозіон. Дослідження проводилися при наступних значеннях режимних параметрів: температурний напір пара-стінка $\Delta t = (0.3...10)^\circ\text{C}$, швидкість парового потоку $W < 1 \text{ м/с}$, щільність теплового потоку $q = (68000...108862) \text{ Вт/м}^2$. Досліди проводились на латунній трубі, тому щолатунь досить міцно сприймає і утримує ПАР, зокрема Нанопротек Антикор і Нанопротек Анतिकорозіон

утворювали надійну оболонку на мономолекулярному рівні, яка захищала поверхню теплообміну від окиснення.

Провівши дослідження процесу конденсації на пластинчатому теплообмінному апараті, де пластини покриті спрієм поверхнево-активною речовиною. На поверхні пластин спостерігались псевдо краплини. Це пояснюється складною формою пластини та взаємодією спрію зі сталлю. В усіх випадках був отриманий вигравш по тепловіддачі в декілька разів по відношенню до плівкового режиму конденсації.

Сучасні поверхнево-активні речовини, суттєво покращують покриття конденсації в теплообмінних установках. Вони поліпшують водовідштовхувальні властивості покриття.

Їх використання спрощує процес утворення конденсації на поверхні, поліпшує відштовхувальні властивості та забезпечують вищу ефективність теплопередачі.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Nusselt. Die Oberflächenkondensation des Wasserdampfes. / Nusselt. // Z. Vereines Deutch. Ing. 60. – 1916. – С. S. 541–546, 569–57.
2. Jacobs, H. R. Direct Contact Condensers. Heat Exchanger Design / Jacobs, H. R. // Handbook, Ed. E. U. Schlunder, Hemisphere Publishing Corporation, New York. – 1985.
3. Исаченко В.П. Теплопередача. Учебник для вузов, Изд. 3-е, перераб. и доп. - М.: Энергия. – 1975. - 488с.
4. Rose, J. W. Dropwise Condensation. Heat Exchanger Design Update / Rose, J. W. // 2.6.5 , Begell House. – 1994.
5. Басова Н.М. Тепломасообмін / Басова Н.М., Дяченко С.В., Романтовський В.І. – м.Харків.: «Харківський національний університет будівництва та архітектури», 2019. – 45 с.
6. Karen G. New approach to hydrophobic material could benefit power plants, cooling systems / Karen G., Krip V.. // Journal Advanced Materials. – 2013. – P. 35–37.
7. Zhao F. Highly Efficient solar vapour generation via Hierarchically nanostructured gels. / Zhao F, Zhou X, Shi Y end others]. // Nature Nanotechnology. – 2018. – P. 489–495.
8. Roach P. Progress in super hydrophobic surface development. / Roach P., Shirtcliffe N.J., Newton M.I.. // Soft Matter. – 2008. – P. 224 – 240.
9. Lu M.C. Critical heat flux of pool boiling on Si nanowire array-coated surfaces / Lu M.C., Chen R., Srinivasan V. end others]. // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2011. – P. 25–26.
10. Wen R.F. Hydrophobic copper nanowires for enhancing condensation heat transfer / Wen R.F., Li Q., Wu J.F. end others]. // Nano Energy. – 2017. – P. 177 – 183.
11. Mouterde T. Antifogging abilities of model nanotextures / Mouterde T., Lehoucq G., Xavier S. and others]. // Nature Materials. – 2017. – P. 658 – 663.
12. Li Y. Bubble-regulated silicon nanowire synthesis on micro-structured surfaces by metal-assisted chemical etching. / Li Y., Duan C.. // Langmuir. – 2015. – P. 12291 – 12299.

13. Lo C.W. Scale effect on dropwise condensation on superhydrophobic surfaces. / Lo C.W., Wang C.C., Lu M.C. // ACS Applied Materials & Interfaces. – 2014. – P. 14353–14359.
14. Lo C.W. Spatial control of heterogeneous nucleation on the superhydrophobic nanowire array. / Lo C.W., Wang C.C., Lu M.C. // Advanced Functional Materials. - 2014. - P. 1211 - 1217.
15. Chen X.M. Nanograssed micropyrarnidal architectures for continuous dropwise condensation. / Chen X.M., Wu J., Ma R.Y. and others]. // Advanced Functional Materials. – 2011. – P. 4617 – 4623.
16. Anderson D.M. Using amphiphilic nanostructures to enable long-range ensemble coalescence and surface rejuvenation in dropwise condensation / Anderson D.M., Gupta M.K., Voevodin A.A. and others]. // ACS Nano. – 2012. – C. 3262 – 3268.
17. Wen R.F. Three-dimensional superhydrophobic nanowire networks for enhancing condensation heat transfer / Wen R.F., Xu S.S., Ma X.H. and others]. // Joule. – 2018. – P. 269–279.
18. Wen R.F. Hierarchical superhydrophobic surfaces with micropatterned nanowire arrays for high-efficiency jumping droplet condensation / Wen R.F., Xu S.S., Zhao D.L. and others]. // ACS Applied Materials & Interfaces. – 2017. – P. 44911 – 44921.
19. Wen R. Sustaining enhanced condensation on hierarchical mesh-covered surfaces / Wen R., Xu S., Zhao D. and others]. // National Science Review. – 2018. – P. 878 – 887.
20. Alfred Leipertz. Tropfendensation auf ionen implantierten metaloberflächen, Universität Erlanger / Alfred Leipertz. // Lehrstuhl für technische thermodynamic. – 2007.
21. Toshiaki H. Polyester blow-molded articles / Toshiaki H., Katsutoshi M., Eiichiro T. // US Patent No: 5,324,556. – 1994.
22. Josephus M. Making surface hydrophobic by ion etching by means of glow discharging / M. Josephus, J. Hendrik. // US Patent 5. – 1997
23. Остроухова О.И. Синтез свойства дисульфидов как гидрофобизаторов для создания режима капельной конденсации на медесожержащих поверхностях / Остроухова О.И., Мокрушин В.С.. // ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный

- университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г.Екатеринбург. – 2011. – С. 22 – 27.
24. Alfred Leipertz. // *Jornal of Chiminal and Engineering Date* 60. – 2015. – P. 3759 – 3765.
25. Остапенко О.Ю. Конденсація водяної пари на металевих поверхнях в присутності поверхнево-активних речовин // Атестаційна магістерська робота, ТПТ, НТУУ «КПІ», Київ 2008. – 118с.
26. Murase T. Effect of inundation for condensation of steam on smooth and enhanced condenser tubes / Murase T., Wang H.S., Rose J.W.. // *Heat and Mass Transfer*. – 2006. – P. 3180 – 3189.
27. Минухин Л.А. Влияние загрязненности пара на срок службы стимуляторов капельной конденсации / Минухин Л.А., Емелина Е.П., Романова З.Н., Шабалин К.Н. // *Изв. Вузов. Энергетика*. – 1968. – С. 34 – 39.
28. McNeil D.A. Condensation of Steam on a Small Tube Bundle at Turbine Condenser Conditions / McNeil D.A., Burnside B.M., Cuthbertson G. // *Experimental Heat Transfer*. – 2000. – P. 89–105.
29. Serdar O. Experimental investigation and modeling of dropwise condensation on a horizontal gold coated tube // *A thesis submitted to the graduate school of natural and applied sciences of middle East technical university*, December 2004, 141 pages.
30. Гавриш А.С., Дейнеко А.И., Рейда А.В. Конденсация водяного пара на гидрофобных поверхностях с различной теплопроводностью // *Проблемы газодинамики и теплообмена в энергетических установках: Труды XV Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И.Леонтьева, посвященных 175-летию МГТУ им. Н.Э. Баумана*. М.: Издательство МЭИ, 2005, Т.1. С. 173 - 176.
31. Гавриш А.С., Гавриш С.А., Остапенко О.Ю. Про особливості кута змочування та механізму конденсації // *Енергетика, економіка, технології, екологія*. - 2007. - С. 33 – 38.

Додаток А

Розрахунок похибки експерименту

Масова витрата охолоджуючої води відповідно до рівняння суцільності (нерозривності) визначається так, кг/с:

$$m = \rho W f, \quad (1)$$

де, площа поперечного перерізу трубки визначається як, м²:

$$f = \frac{\pi d^2}{4}. \quad (2)$$

Тоді тепловий потік конвекцією, що сприймається охолоджуючою рідиною, визначиться за балансовим співвідношенням, Вт:

$$Q_{\text{конв}} = m \cdot C_p \cdot (t_{\text{вих}} - t_{\text{вх}}). \quad (3)$$

Згідно з формул (1), (2), (3) можна вирахувати абсолютну похибку визначення середнього коефіцієнта тепловіддачі. При цьому похибками заокруглення табличних даних і констант можна буде знехтувати в силу їх незначних величин.

Абсолютна похибка визначення масової витрати охолоджуючої води буде визначатися відповідно до формули (1), кг/с:

$$\Delta m = \left[\left(\frac{\partial m}{\partial W} \Delta W \right)^2 + \left(\frac{\partial m}{\partial d} \Delta d \right)^2 \right]^{0.5}, \quad (4)$$

де, ΔW , м/с - абсолютна похибка визначення швидкості потоку охолоджуючої води за показаннями відповідного приладу, яка дорівнює половині найменшої ціни поділки його шкали, $\Delta d = 10^{-3}$ м - абсолютна похибка визначення діаметра, яка відповідає абсолютним похибкам визначення інших лінійних величин: $\Delta L = 10^{-3}$ м.

Після визначення відповідних похідних маємо, кг/с:

$$\Delta m = \frac{\rho \pi}{4} \left[(d^2 \Delta W)^2 + (2Wd\Delta d)^2 \right]^{0.5}. \quad (5)$$

Аналогічно можна розрахувати абсолютну похибку визначення конвективного теплового потоку відповідно до формули (3), яка після підстановки похідних обчислюється як, Вт:

$$\Delta Q_{\text{конв}} = Cp \left((t_{\text{вих}} - t_{\text{вх}}) \Delta m \right)^2 + 2(m\Delta t)^2, \quad (6)$$

де, Δt , °C - абсолютна похибка визначення температури охолоджуючої води, яка дорівнює половині найменшої ціни поділки шкали вимірювального приладу.

Тоді абсолютна похибка визначення коефіцієнта тепловіддачі буде дорівнювати, Вт/(м²·°C):

$$\Delta \alpha = \frac{1}{\pi \cdot d \cdot L \cdot (t_c - t_0)} \left[\Delta Q_{\text{конв}}^2 + \left(\frac{Q_{\text{конв}}}{d} \Delta d \right)^2 + \left(\frac{Q_{\text{конв}}}{L} \Delta L \right)^2 + 2 \left(\frac{Q_{\text{конв}}}{t_c - t_0} \Delta t \right)^2 \right]^{0.5}. \quad (7)$$

Для розрахунку відносної похибки визначення коефіцієнта тепловіддачі треба величину $\Delta \alpha$, отриману із застосуванням формули (7), віднести до експериментального $\alpha_{\text{експ}}$

В даній роботі похибка експерименту розраховувалась по вище приведеній методиці. Відносна експериментальна похибка склала не більше 20 %.

Додаток Б

Ф.№ 3.3

СПИСОК НАУКОВИХ ПРАЦЬ Федорець Дарини Станіславівни

Назва (мовою оригіналу)	Характер праці	Вихідні дані	Обсяг, стор.	Співавтори
1	2	3	4	5
1. Пожежна безпека інженерного обладнання теплоенергетичних підприємств: котельні та паротурбінні установки	Стаття	ISBN978-966-984-060-8 УДК 331(45+1)+614:82-5 Проблеми охорони праці, промислової та цивільної безпеки: Збірник матеріалів Двадцять п'ятої Всеукраїнської науково-методичної конференції (з участю студентів), м. Київ, 17-19 листопада 2021 р. – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 203 с. – С. 40-46.	7 стор.	Гавриш А.С.
2. Перспективи використання сучасних поверхнево-активних речовин в теплообмінниках.	Тези	XX Міжнародна науково-практична конференція „Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики”, Київ, 26-29 квітня 2022 р. – К.: КПІ ім. І. Сікорського. - 2022. – Т. 1.	2 стор.	Гавриш А.С.

Список наукових праць студентки кафедри атомних електричних станцій і інженерної теплофізики Федорець Дарини Станіславівни: усього 2 найменування; список наведений на 1 сторінці.

Автор

Федорець Д.С.

7	Студенческая работа	ID файла: 1005749115	Учебное заведение: National University of Water Manag	3 Источник	0.18%
8	Dis_Semenyako A. V._1	ID файла: 5515065	Учебное заведение: National Technical University of Ukraine "Kyiv Pol...		0.17%
9	Suzdalev O	ID файла: 1009581104	Учебное заведение: National Technical University of Ukraine "Kyiv Po	4 Источник	0.17%
10	Студенческая работа	ID файла: 1005970317	Учебное заведение: Donetsk National Technical University		0.17%
13	Момот	ID файла: 5831455	Учебное заведение: National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Instit...		0.15%
15	Sovetov_HN-71_bakalavr_2021	ID файла: 1008369800	Учебное заведение: National Technical University	13 Источник	0.13%
16	Gureiev_magistr	ID файла: 1009117034	Учебное заведение: National Technical University of Ukraine "К	2 Источник	0.13%
17	Ярошенко В.Ф. ТС-з01мп	ID файла: 1009657307	Учебное заведение: National Technical University of	18 Источник	0.13%
18	ПЗМД_КПИ_АУТС_2019_ЧерватюкАВ	ID файла: 11954951	Учебное заведение: National Technical University of...		0.13%
20	Студенческая работа	ID файла: 5968745	Учебное заведение: National University of Water Managem	3 Источник	0.13%
31	Первак С.Г._PI-72мп, РТФ	ID файла: 8216464	Учебное заведение: National Technical University of Ukraine "Ку...		0.1%
32	Студенческая работа	ID файла: 1044795	Учебное заведение: National University of Life and Environ	2 Источник	0.1%
33	ПЗМД_АУТС_КПИ_2020_Дмитрук_МВ	ID файла: 1005775797	Учебное заведение: National Technical U	2 Источник	0.1%
34	Студенческая работа	ID файла: 1007912016	Учебное заведение: National Aviation University	3 Источник	0.1%
35	TF41-GlushkoIV-diploma-2018	ID файла: 5972605	Учебное заведение: National Technical University of Ukraine "К...		0.1%
36	Студенческая работа	ID файла: 1009727360	Учебное заведение: National Aviation University	2 Источник	0.1%