

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

ГРИЩЕНКО РОМАН ВОЛОДИМИРОВИЧ

УДК 621.565.2.4:4

**ДИНАМІКА ТАНЕННЯ ЛЬОДУ В ЕЛЕМЕНТАХ АКУМУЛЯТОРІВ ЕНЕРГІЇ,
СИСТЕМ ОХОЛОДЖЕННЯ ТА КОНДИЦІОНУВАННЯ ПОВІТРЯ**

05.14.06 – технічна теплофізика та промислова теплоенергетика

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2021

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано в Національному університеті харчових технологій
Міністерства освіти і науки України, м. Київ.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент
ФОРСЮК Андрій Васильович
Національний університет харчових технологій,
м. Київ, професор кафедри теплоенергетики та
холодильної техніки

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
ХМЕЛЬНЮК Михайло Георгійович
Одеська національна академія харчових техно-
логій МОН України, завідувач кафедри холоди-
льних установок і кондиціонування повітря

кандидат технічних наук, старший науковий
співробітник
БЄЛЯЄВА Тетяна Геннадіївна
Інститут технічної теплофізики НАН України,
старший науковий співробітник

Захист відбудеться «04» березня 2021 року о 13⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 26.058.05 у Національного університету харчових технологій за адресою: 01601, м. Київ, вул. Володимирська, 68, корпус «А» аудиторія А-311.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного університету харчових технологій за адресою: 01601, м. Київ, вул. Володимирська, 68.

Автореферат розісланий «02» лютого 2021 року.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
К 26.058.05,
к. т. н., доцент

Л. О. Власенко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. В умовах постійного збільшення попиту на енергоресурси, що супроводжується забрудненням довкілля, постала необхідність розробки та впровадження передових технологій для зменшення енергоспоживання шляхом підвищення його ефективності з одночасним підвищенням ефективності систем генерації енергії та ефективним використанням альтернативних та відновлюваних джерел енергії.

На більшості підприємств харчової промисловості, де використовують штучне охолодження, найбільшим споживачем електричної енергії є електрообладнання холодильних установок. Велика частка енергоспоживання припадає також на сучасні системи кондиціонування повітря. Особливістю роботи таких установок є значні добові та сезонні коливання споживання електричної енергії внаслідок нерівномірності споживання штучного холоду на підприємствах харчової галузі. Тому, застосування періодичних накопичувачів теплової енергії (*Thermal Energy Storage (TES)*) є ефективним інструментом в процесах своєчасного реагування на стрімкі пікові зміни попиту на теплову енергію (холод) при збереженні відносно рівномірного навантаження на тепло-холодогенеруюче обладнання.

Крім того, внаслідок зростання числа енергогенеруючих станцій на відновлюваних та альтернативних джерелах енергії, із суттєво змінним режимом генерації, також виникає необхідність в розробленні інноваційних рішень для зберігання енергії. Зберігання низькотемпературної енергії (*Cold Thermal Energy Storage (CTES)*) зазвичай передбачає накопичення потенціалу охолодження у відповідному середовищі при температурі, нижчій від номінального значення, необхідного для функціонування системи охолодження. Основна мета впровадження CTES – перевести використання електричної енергії з пікових годин на непікові. В цей час електроенергія використовується для зарядки накопичувача з метою повного, або часткового покриття пікового навантаження на холодильне обладнання. CTES може потенційно знизити максимальне споживання енергії, піковий попит, а головне – середню вартість споживаної енергії.

Серед цих технологій найпоширенішою в промисловості є технологія так званого зовнішнього накопичення льоду на теплообмінній поверхні, відповідно до якої вода є одночасно і холодоносієм, і накопичувальним середовищем. Під час накопичення холодоносіїв (вода) намерзає на поверхні труб, що охолоджуються холодоагентом чи проміжним холодоносієм, а під час «розрядження» – холодоносіїв охолоджується в процесі танення льоду.

Основний технологічний недолік систем зберігання на основі РСМ полягає в повільній динаміці процесів накопичення/розрядження внаслідок низької інтенсивності теплообміну в об'ємі холодоносія в процесі фазового перетворення. Крім того, відсутні адекватні методики розрахунку теплообміну під час періодичного заморожування та танення накопичувального середовища, тому їх створення є актуальною задачею, розв'язок якої дозволить проектувати апарати з оптимальними теплотехнологічними характеристиками.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертація виконана в рамках науково-дослідних робіт кафедри теплоенергетики та холодильної техніки Національного університету харчових технологій, «Розроблення наукових основ створення високоефективного тепломасообмінного обладнання для харчової промисловості № 0112U002987», «Розроблення енергозберігаючих технологій, ефективних схем тепло- та холодопостачання, теплотехнологічних комплексів з максимальним використанням ВЕР на підприємствах харчової промисловості» та «Розроблення математичних моделей тепло- та холодозабезпечення технологічних об'єктів харчової промисловості та їх програмного забезпечення».

Мета і завдання досліджень. Мета роботи – на основі комплексних теоретичних та експериментальних досліджень процесів теплообміну і гідродинаміки під час танення водяного льоду при змішаному режимі конвекції з переважаючими ефектами плавучості отримати напівемпіричні залежності для розрахунку інтенсивності теплообміну під час танення водяного льоду, та розробити науково обгрунтовані теоретичні та практичні засади розрахунку акумуляторів холоду з фазовими перетвореннями.

Відповідно до поставленої мети досліджень сформульовані та вирішені наступні основні завдання:

- провести експериментальне дослідження процесу теплообміну у воді під час танення льоду при змішаному режимі конвекції з переважаючими ефектами плавучості;
- провести аналіз результатів експериментального дослідження з метою отримання напівемпіричних залежностей для розрахунку інтенсивності теплообміну у воді під час танення льоду при змішаному режимі конвекції з переважаючими ефектами плавучості;
- провести чисельне дослідження теплообміну у воді в області інверсії густини при змішаному режимі конвекції з переважаючими ефектами плавучості;
- розробити методіку термодинамічного аналізу ефективності систем холодопостачання з холодоакумулюючими пристроями.

Об'єкт і предмет дослідження. *Об'єкт дослідження* – тепло-гідродинамічні процеси під час плавлення льоду в умовах омивання холодоносієм при змішаному режимі конвекції. *Предмет дослідження* – струменеві течії води під час омивання поверхні льоду.

Методи дослідження – експериментальні із застосуванням сучасних засобів автоматизації вимірювального комплексу та статистичного оброблення результатів експериментального дослідження, математичне моделювання, комп'ютерне моделювання в комплексі програм ANSYS CFX Acad. 15.0.

Наукова новизна одержаних результатів. В ході вирішення поставлених задач були отримані такі наукові результати:

– *вперше розроблено* розрахункові залежності для визначення інтенсивності теплообміну під час змішаної та перехідної конвекції у замкненій порожнині, що адекватно описують результати експериментального дослідження;

– *верше в результаті комплексного теоретичного та експериментального дослідження* розроблені нові моделі та алгоритми розрахунку для визначення інте-

нсивності теплообміну під час змішаної турбулентної та перехідної конвекції у замкненій порожнині;

- *вперше отримані експериментальні результати з динаміки танення льоду при змішаному режимі конвекції з переважаючими ефектами плавучості;*

- *дістала подальший розвиток функція аналога турбулентного числа Прандтля без зміни стандартних модельних коефіцієнтів в «SST k- ω » моделі турбулентності, що дозволило розробити адекватну чисельну модель теплообміну в процесі змішаної конвекції у воді з переважаючим впливом ефекту плавучості. Результати валідації результатів моделювання засвідчили, що застосування розробленої моделі турбулентного аналога числа Прандтля в «SST k- ω » моделі теплогідродинамічного розрахункового CFD-паketу на базі коду ANSYS CFX дозволила отримати задовільну відповідність результатів розрахунку теплообміну дослідним даним під час розв'язання задачі змішаної конвекції води поблизу точки інверсії в обмеженому просторі.*

- *дістала подальший розвиток математична модель динаміки танення льоду на основі CFD-моделювання, що дозволило верифікувати «standart k- ϵ », «standart k- ω » та «SST k- ω » моделі турбулентності на базі коду ANSYS CFX Acad. 15.0 для чисельного моделювання процесів перенесення відповідно до умов змішаної конвекції води поблизу точки інверсії в обмеженому просторі;*

- *запропонована кореляційна модель узагальнення результатів дослідження динаміки танення льоду з використанням функції турбулентного аналога числа Прандтля, отриманої на основі принципу Ле Шательє-Брауна в зоні затухання турбулентності поблизу твердої поверхні в умовах змішаної конвекції поблизу точки інверсії в обмеженому просторі;*

- *запропоновано використовувати «зональну температуру» як визначальну під час апроксимації результатів експериментального дослідження теплообміну в процесі змішаної турбулентності та перехідної конвекції в області інверсії густини води;*

- *запропоновано використовувати принцип Ле Шательє-Брауна для розроблення загального вигляду розрахункової кореляційної залежності у вигляді суперпозиції механізмів природної та вимушеної конвекції;*

- *проведено комплексний статистичний аналіз результатів експериментального дослідження на базі розроблених комплексів безрозмірних чисел подібності;*

Обґрунтованість і достовірність отриманих результатів підтверджується застосуванням сучасних методик проведення експериментальних досліджень, засобів вимірювання та автоматизації вимірювального комплексу, методів статистичного оброблення дослідних даних; методів математичного моделювання, комп'ютерного моделювання, інформаційно-комп'ютерних технологій і підтверджується відповідністю розрахунків за розробленими моделями результатам експериментального дослідження.

Практичне значення одержаних результатів. Результати роботи призначені для використання під час проектування систем холодопостачання на базі накопичувачів низькопотенціальної енергії (акумуляторів холоду CTES).

Розроблені методики CFD-моделювання та верифіковані результати експериментального дослідження, передані провідним проектно-впроваджувальним органі-

заціям України для впровадження під час розроблення систем теплохолодопостачання з CTES.

Особистий внесок здобувача. За безпосередньої участі автора отримані наступні результати: розроблено та виготовлено експериментальну установку, розроблено комплексну систему автоматизації експериментального дослідження та обробки експериментальних даних на базі сучасної комп'ютерної техніки, розроблено методику CFD-моделювання, що дозволила верифікувати «Standard k- ϵ », «Standard k- ω » та «SST k- ω » моделі турбулентності для чисельного моделювання процесів перенесення відповідно до умов змішаної конвекції води поблизу точки інверсії в обмеженому просторі; розроблена модель зміни турбулентного аналога числа Прандля в зоні затухання турбулентності поблизу твердої поверхні умов змішаної конвекції, розроблено розрахункові залежності для визначення інтенсивності теплообміну під час змішаної та перехідної конвекції у замкненій порожнині. Особисто проведено експериментальні дослідження, математичне статистичне опрацювання їх результатів, комп'ютерне моделювання, аналіз результатів досліджень.

Апробація результатів дисертації. Основні результати роботи обговорювались та доповідались на: Міжнародних науково технічних конференціях молодих вчених та студентів «Стан, досягнення і перспективи холодильної техніки і технології» (Одеса, ОНАХТ, 2014-2015); Міжнародна наукова конференція присвячена 130-річчю НУХТ «Нові ідеї в харчовій науці – нові продукти харчової промисловості» (Київ, НУХТ, 13-16 квітня 2014р.); IX міжнародній конференції «Проблеми промислової теплотехніки» (Київ, ІТТФ НАН України 2015); 8th Central European Congress on Food 2016 – Food Science for Well-being, (Kyiv, NUFT, 23-26 May 2016); III Международной научно – практической конференции «Переработка и управление качеством сельскохозяйственной продукции» (Минск, Республика Беларусь, 23 – 24 марта 2017); Міжнародних наукових конференціях молодих учених, аспірантів і студентів «Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті» (Київ, НУХТ, 2014-2020); XI міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні проблеми холодильної техніки і технології» (Одеса, ОНАХТ, 21 – 22 вересня 2017); X anniversary international scientific and technical conference Kazakhstan-refrigeration 2020 (Nur-Sultan, Kazahstan, March 4-5, 2020)

Публікації. За темою дисертації опубліковано 26 друкованих праць, в тому числі: 1 стаття, що входить до наукометричної бази Web of Science, 1 стаття в закордонному спеціалізованому науковому журналі Європейського союзу, 5 статей спеціалізованих наукових журналах України, 1 стаття в збірнику статей конференції та 19 тез доповідей в збірниках праць міжнародних науково-практичних конференціях.

Структура роботи. Робота складається із вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел із 215 найменувань. Зміст роботи викладено на 170 сторінках машинописного тексту. Дисертація ілюстрована 41 рисунками та 8 таблицями.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтована актуальність роботи, визначені основні завдання досліджень, наведені наукова новизна і практична цінність отриманих результатів.

У **першому розділі** проведено аналіз існуючих літературних джерел за тематикою дисертаційної роботи. Наведено порівняльний аналіз існуючих чисельних методів розв'язання задач зміни фазового стану на базі рівнянь теплопровідності. Відзначено, що при аналізі класичної задачі Стефана-Ньюмена цими методами, конвекція в рідкій фазі не враховується внаслідок значних складностей, пов'язаних з математичною реалізацією відповідних моделей, оскільки в цих методах основною вимогою була формальна коректність математичної моделі, а адекватністю фізичної моделі, як правило, нехтували. Для безпосередньо аналізу Стефана – це майже не впливає на достовірність результату, оскільки в водоймах під час льодоутворення на горизонтальних поверхнях за низьких температур води вкладом вільної конвекції в інтенсивність теплообміну можна знехтувати. Те ж саме стосується задачі плавлення та тверднення металів, оскільки для рідких металів молекулярна складова механізму перенесення, як правило, значно переважає конвективну. При аналізі досліджень конвективного теплообміну в рідині під час процесу плавлення (танення), встановлено, що, в першу чергу, основною задачею вищерозглянутих досліджень було розроблення математичного апарату для моделювання процесів перенесення під час природної та змішаної конвекції, а також формальна верифікація математичних моделей процесів природної та змішаної конвекції без перевірки адекватності фізичної моделі шляхом валідації результатів моделювання результатами експериментального дослідження.

Під час аналізу CFD – моделювання процесів турбулентної природної та змішаної конвекції, встановлено, що на сьогодні практично відсутні комплексні чисельні та експериментальні дослідження процесів теплообміну під час турбулентної природної та змішаної конвекції в умовах інверсії густин. Дослідження з валідації CFD-моделей природної турбулентної конвекції практично відсутні, а з валідації CFD-моделей турбулентної змішаної конвекції вкрай обмежена. Для природної та змішаної турбулентної конвекції, під час яких слід очікувати затухання турбулентності поблизу стінки, вірогідних даних з визначення Pr_t в літературі немає, що знижує фізичну адекватність моделювання на базі існуючих CFD-кодів.

В результаті аналізу сформульовані мета та основні завдання наукового дослідження та вибрані шляхи їх вирішення.

У **другому розділі** наведено опис експериментальної установки, методики проведення експериментального дослідження, оброблення дослідних даних, оцінка похибок вимірювань.

Дослідження процесів процесу теплообміну у воді під час танення льоду при змішаному режимі конвекції з переважаючими ефектами плавучості проводилося на спроектованій експериментальній установці. Схема експериментальної установки наведена на рис.1. Установка виготовлена та змонтована на кафедрі теплоенергетики та холодильної техніки Національного університету харчових технологій, де і проведені досліді.

Експериментальна установка складається з трьох однакових дослідних секцій. В середині кожної секції знаходиться мідна труба висотою 300 мм та зовнішнім діаметром 10 мм, товщина стінки труби – 1 мм. Омивання мідної труби відбувається охолодженою рідиною, що поступає у водяну сорочку діаметром 180 мм та виконана з органічного скла. Циркулюючий водяний контур складається з насоса 21, ємно-

сті для води 23, систем управління та вимірювання, включаючи регулювання, а також запірної арматури, 14,17. Враховуючи, що подача води відбувалася з нижньої частини дослідних секцій, присутні висхідні потоки води. Витрата води контролюється ротаметрами, регулюється і підтримується сталою протягом кожного експерименту за допомогою прецизійних голчастих клапанів. Вимірювання витрати води здійснювалось об'ємним методом.

Витрата води задається та підтримується індивідуально для кожної дослідної секції. Необхідна температура води, що подається в дослідні секції, підтримується за допомогою увімкнення/вимкнення подачі холодоагенту у теплообмінник або електричного нагрівача 24, що знаходиться в ємності з водою 23. Експериментальні секції паралельно підключені до холодильного контуру для забезпечення повторюваності експерименту.

Холодильний агрегат оснащений необхідними системами управління, що дозволяють вимірювати і регулювати: тиск і температуру випаровування холодоагенту в середині дослідних секцій, а також тиск конденсації під час проведення дослідів.

Експерименти проводились на всіх дослідних секціях одночасно, що дає можливість отримати достовірні дослідні дані, зменшуючи випадкову похибку та забезпечується повторюваність результатів проведеного дослідіду.

Витрата води через кожен апарат встановлювалась на початку експерименту та підтримувалась під час проведення дослідіду на поділці 0,42 м³/год (7 л/хв), 0,9 м³/год (15 л/хв), 1,2 м³/год (20 л/хв)

Температура води, що поступає в дослідні секції змінювалась в межах 1...10 °С. Температура кипіння холодоагенту для початкової генерації льоду в межах -10...-25 °С, крок 5 К.

Для кожної температури води проведено чотири дослідіди з різною температурою кипіння холодоагенту. Дані фіксувались за допомогою програми EZ Data Logger v.4.5., передбачалось опитування модулів, та фіксація отриманих результатів в базу даних, рис. 2. Час опитування задається і становить від 0,1 с.

Для фіксації параметрів роботи установки встановлено шість термопар хромель-капель та вісім мідь-константанових. Контроль тиску кипіння в кожній дослідній секції відбувався за допомогою манометрів фірми CASTEL, а також електронних датчиків тиску. Манометри заповнено гліцерином, ціна поділки становить 0,2 бар, клас точності – 1,0. Для фіксації параметрів тиску всмоктування та нагнітання, на компресорі встановлено манометри низького та високого тиску, фірми CASTEL, також заповнені гліцерином, з ціною поділки – 1 бар, клас точності – 1,6.

Вимірювання витрати води через дослідні секції відбувалось за допомогою ротаметрів з регулятором потоку FM 10 (5...35л/хв).

Для фіксації діаметру згенерованого льоду на теплообмінній поверхні, використано систему оптичного вимірювання, що базується на цифровому фотоапараті NIKON P100, що має розширення 64 МП. Для фіксації фотокамери, використано спеціальний штатив. Фотокамеру встановлено таким чином, щоб в кадр потрапляла експериментальна секція. Керування системою оптичного вимірювання відбувалось з комп'ютера фірми Lenovo Z510.

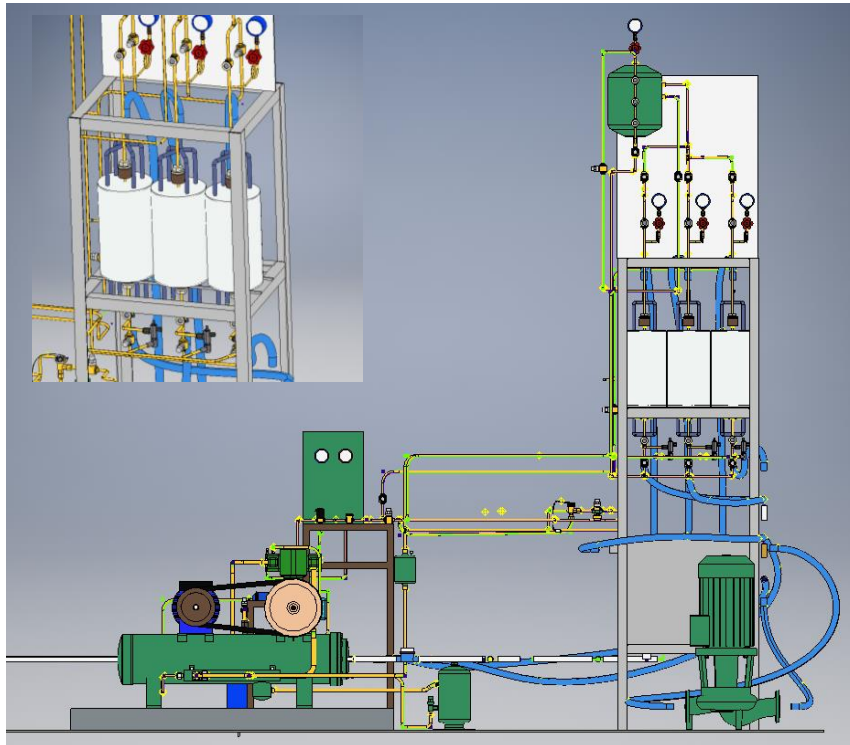
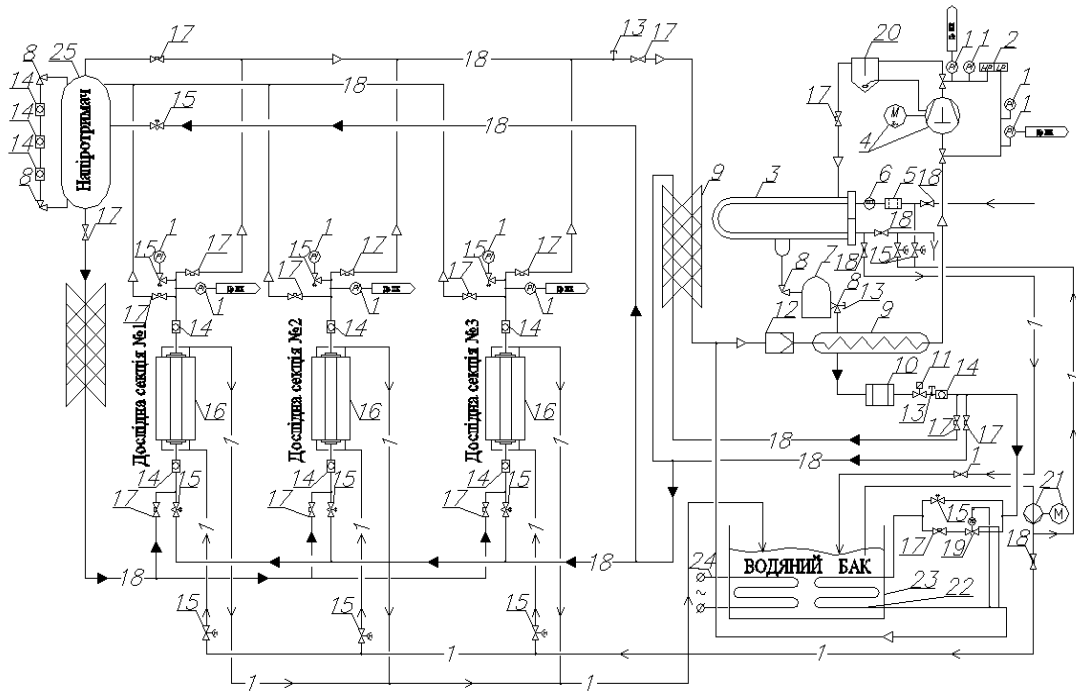


Рис.1. Схема та тривимірний модель експериментальної установки

1 - манометри; 2 - реле тиску; 3 – водяний конденсатор; 4 – поршневий компресор; 5, 10 – фільтр; 6 – лічильник втрати води; 7 – ресивер;

8, 11, 15, 17, 18, 19 – регулюючий вентиль; 9 – регенеративний теплообмінник; 14 – оглядове віконце (з індикатором вологості); 16 – дослідні секції, з ротаметрами; 20 – мастилозбірник; 21 – водяний насос; 22 – теплообмінник; 23 – водяний бак; 24 – електричний підігрівник; 25 – напіротримач;

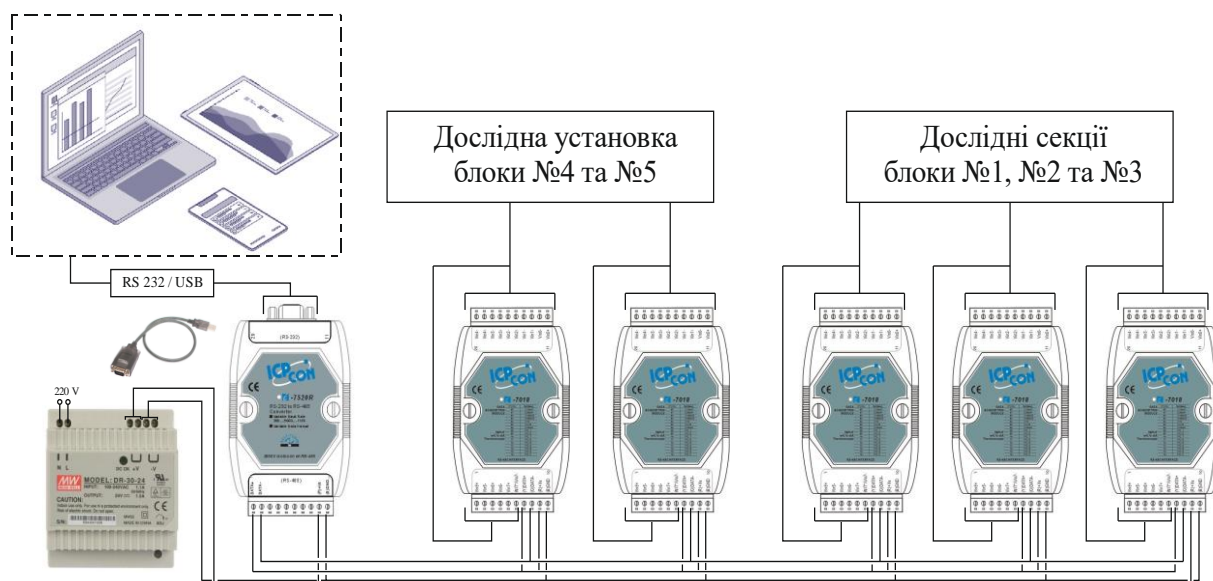


Рис.2. Схема автоматизації експериментального дослідження

У **третьому розділі** проведено попередній аналіз експериментальних даних та передбачено розв'язання наступних задач: підвищення якості вихідної інформації (видалення неоднорідностей даних), отримання основних ймовірнісних характеристик експериментальних даних, отримання основних ймовірнісних характеристик параметрів, що визначаються опосередковано з використанням математичної моделі.

Встановлено, що переважаючим механізмом перенесення є вільна конвекція. Попередньо виконано порівняння результатів експериментального дослідження з апробованими розрахунковими залежностями, які є найбільш вживаними при аналізі теплообміну під час вільноконвективного теплообміну.

Акцентовано на особливостях аналізу даних з тепловіддачі під час вільноконвективного руху в замкненій порожнині, пов'язаних з невизначенністю осередненої визначальної температури потоку під час вільної конвекції в обмеженому просторі під час танення льоду у формі залежності Ньютона-Ріхмана внаслідок аномалії густини води при 4 °С. А оскільки коефіцієнт тепловіддачі, як коефіцієнт пропорційності в рівнянні Ньютона-Ріхмана, не має безпосереднього фізичного сенсу, то відкритим залишається питання про фізичну достовірність та, відповідно, розрахункову вірогідність безрозмірнісних рівнянь, отриманих з його застосуванням.

Встановлено суттєву, як кількісно, так і якісно, відмінність розрахункової, за існуючими в літературі рівняннями, та експериментальної інтенсивності тепловіддачі в умовах вільної конвекції за обмеженої висоти експериментальної секції та впливом рухомого холодоносія, який омиває поверхню льоду в процесі його танення. Крім того, внаслідок обмеженості висоти та об'єму експериментальної секції режим руху рідини в ній був перехідним від ламінарного до розвиненого турбулентного, а рекомендацій для розрахунку теплообміну в даній області, внаслідок складності процесу, в доступній літературі немає.

Виконано аналіз методів представлення результатів з інтенсивності процесів тепловіддачі під час змішаної конвекції як суперпозиція розв'язків для ламінарної та турбулентної течії у формі

$$Nu_m^n = Nu_F^n \pm Nu_N^n. \quad (1)$$

в якій показник степеню n приймає різні значення залежно від орієнтації поверхні теплообміну, напрямів руху, тощо; або у формі підсумовування, з точки зору вектор-простору (vector-space) ℓ^p -нормованої функції (ℓ^p -norm function), природного та вимушеного конвекційних компонентів

$$\| \text{Nu}_F, \text{Nu}_N \|_p = (|\text{Nu}_F|^p + |\text{Nu}_N|^p)^{1/p}, \quad (2)$$

якщо вимушена та природна конвекція характеризуються однаковим лінійним масштабом (характерним лінійним розміром).

У випадку, якщо лінійні масштаби не співпадають, останнє рівняння набуває вигляду для вертикальних поверхонь

$$\alpha_m = \lambda \| \text{Nu}_F/L_F, \text{Nu}_V/L_V \|_p. \quad (3)$$

Вибір залежностей для розрахунку теплообміну в обмеженій порожнині для вільноконвективного та вимушеного режимів конвекції в умовах невизначеності режимів течії є вкрай складною методичною задачею, якщо, до того ж, врахувати невизначеність значення показника степеню n . Було поставлено завдання розробити та верифікувати системи безрозмірних чисел подібності, які б вірогідно описували результати експериментального дослідження. Для реалізації задачі обрано метод статистичного аналізу результатів досліджень (регресійного аналізу). У відповідності до нього розроблено ряд безрозмірних систем, після чого, з використанням методів регресійного аналізу результати експериментального дослідження апроксимовано у відповідних системах. Критерієм вірогідності обрано коефіцієнт детермінації. Відзначено, що всі розглянуті системи безрозмірних комплексів забезпечили високі показники вірогідності (коефіцієнт детермінації $R^2 > 98,5\%$). А це означає, що запропоновані системи більш ніж на $98,5\%$ визначають функціональну залежність між числами подібності, що складають відповідні системи. Згідно шкали (співвідношення) Чеддока, це свідчить про надзвичайно тісний зв'язок між ними.

Однак, аналіз методик розрахунку теплообміну під час турбулентного руху рідини свідчить, що практично всі розрахунки за залежностями у вигляді степеневих функцій достовірні лише у достатньо вузькому діапазоні зміни визначальних параметрів процесів, тому актуальною є задача пошуку моделей суперпозиції механізмів конвекції, які б ґрунтувались не на формалізованому чисто математичному підході, а на фізично обґрунтованому. Для розроблення загального вигляду апроксимаційного рівняння застосовано принцип Ле Шательє-Брауна, згідно якого для опису залежності коефіцієнта тепловіддачі в області переважаючої дії природної конвекції введено коефіцієнт ϕ , що враховує гальмування збурень, викликаних вимушеною конвекцією, у вигляді простої релаксаційної залежності

$$d\zeta/df(\text{Re}) = -n\zeta. \quad (4)$$

Тоді, отримаємо $\phi \sim 1 - \exp(f_1(\text{Re}))$.

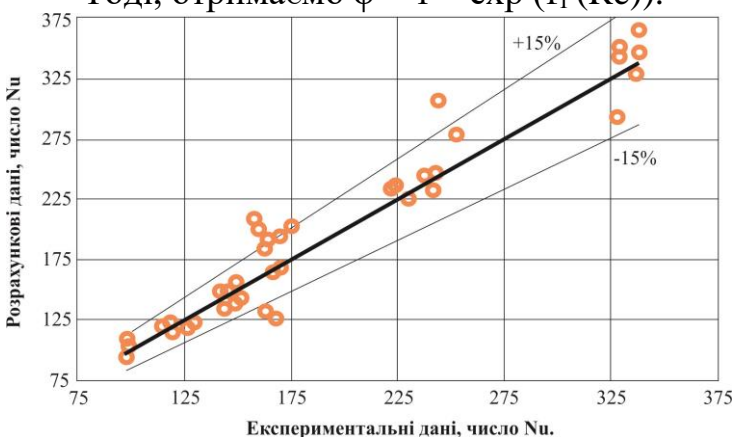


Рис. 3. Графік з стат. обробки даних за форм.

$$\text{Nu} = C_1 \text{Ra}^{C_2} [1 + C_3 \text{Re}^{C_4} (1 - \exp(C_5 \text{Re}))].$$

Відповідно, представимо суперпозицію механізмів природної та вимушеної конвекції у вигляді залежності

$$Nu = C_1 Ra^{C_2} [1 + C_3 Re^{C_4} (1 - \exp(C_5 Re))]. \quad (5)$$

Статистичний аналіз експериментальних результатів з використанням Квазі-Ньютонівської процедури дозволило апроксимувати дослідні дані з $R^2 > 99,35\%$

У **четвертому розділі** проведено реалізацію чисельного дослідження. Аналізувалась тривимірна вісесиметрична задача. Схема розрахункової області наведена на рис. 4. Як масштаб довжини задавалась висота експериментальної секції. Характеристики об'єкту дослідження наведені в розділах 2, 3. Значення визначальних параметрів задавались у відповідності до проведеного експериментального дослідження.

Геометрична модель побудована в програмному комплексі Ansys Acad. 15.0, ліцензійний номер № 1023420. Основою геометричної моделі є коаксіальний циліндр, всередині якого рухаються водяні потоки, омиваючи теплообмінну поверхню мідної трубки. Чотири вхідних та вихідних патрубків знаходяться внизу та вгорі дослідної секції, відповідно. Теплообмінна поверхня мідної труби моделюється вздовж центральної осі коаксіального циліндру, що зображено на рис. 4. Щоб забезпечити найбільш точний розрахунок та достатню кількість ітерацій, дослідна секція формувалась у вигляді сектору в 90 градусів. Тип сітки mesh – multizone (hexa) гексагональна. Мінімальний розмір елемента сітки в основному об'ємі 1 мм, максимальний 5 мм. Використано налаштування пристінних шарів (inflation layer) для створення сітки з тонких елементів, яка здатна адекватно відобразити градієнти в пограничному прошарку по нормалі до поверхні з використанням мінімальної кількості елементів. Межа вода-лід, з наступними параметрами: товщина першої лінії 0,01 мм, темп зростання (Growth Rate) - 1,2; загальна кількість ліній 25 (рис. 5).



Рис. 4. Схема розрахункової області

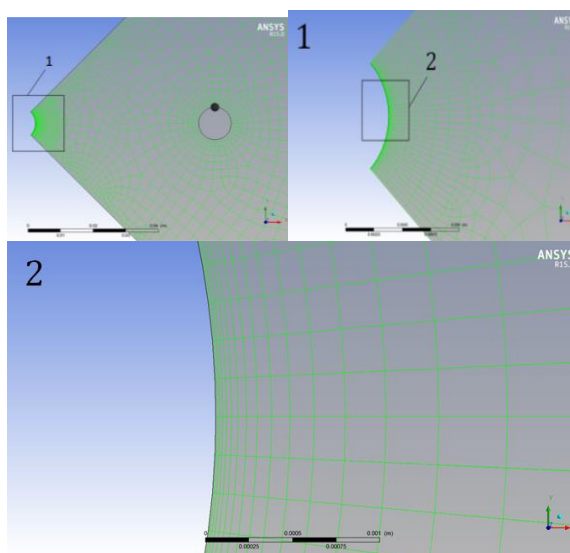


Рис. 5. Межа інфляції

Загальний об'єм досліджуваної області становить 500 тис. вузлів. Щоб уникнути ускладнення задачі, а саме, можливе покриття льодом поверхні охолодження, температуру теплообмінної поверхні (внутрішній циліндр) запрограмовано, як поверхню з температурою 0°C . Температура води, що потрапляє всередину досліджува-

ної області та омиває теплообмінну поверхню, програмувалась в межах від +2 °С до +10 °С. Режим руху води обирався в широких межах, а саме (Laminar, k-epsilon, k-omega, а також k-omega SST(Shear-Stress Transport)).

Щоб досягнути максимальної конвергенції розрахунку тривимірної моделі, додатково в програмну модель, внесені фізичні властивості води: зміна густини води та теплоємності поблизу точки інверсії, крок 0,5°С. Розроблено фізико-математичну модель. Сформульовано крайову конвективну задачу руху та теплоперенесення відповідно до умов задачі. Математична модель розроблена за наступних припущень: течія стаціонарна вісесиметрична відносно осі каналу; поверхня льоду гладка циліндрична; вода – нестислива рідина; режим течії води – турбулізований (перехідний); турбулентність – ізотропна; для моделювання застосовуються RANS-моделі турбулентності.

Диференціальні рівняння збереження для осереднених за Рейнольдсом параметрів:

– диференціальне рівняння збереження кількості речовини (рівняння суцільності)

$$\frac{\partial(u_i)}{\partial x_i} = 0; \quad (6)$$

– диференціальні рівняння збереження механічної енергії (рівняння руху)

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = \rho g_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\rho \overline{u'_i u'_j}); \quad (7)$$

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right); \quad (8)$$

$$-\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \rho k; \quad (9)$$

– диференціальне рівняння збереження внутрішньої енергії (рівняння енергії)

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i h) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\alpha \rho \frac{\partial h}{\partial x_i} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial h}{\partial x_i} \right) + u_i \frac{\partial p}{\partial x_i} + q, \quad (10)$$

де u – швидкість, u' – швидкість турбулентних пульсацій, i, j, k – індекси напрямків у відповідних вузлах розрахункової сітки.

Умови однозначності крайової задачі:

– граничні гідродинамічні умови:

$$u = 0 \Rightarrow z = 0; z = H; 0 < \phi < 2\pi; R_i < r < R; u = 0 \Rightarrow r = R; 0 < z < H; 0 < \phi < 2\pi;$$

– граничні теплові умови:

$$\frac{\partial T}{\partial r} = 0 \Rightarrow r = R; 0 < \phi < 2\pi; 0 < z < H; \frac{\partial T}{\partial r} = 0 \Rightarrow r = R_i; 0 < \phi < 2\pi; 0 < z < H;$$

$$\frac{\partial T}{\partial r} = 0 \Rightarrow z = 0; z = H; 0 < \phi < 2\pi; R_i < r < R; T = T_s = T_m = 0^\circ\text{C} \Rightarrow r = R_w; 0 < \phi < 2\pi; 0 < z < H$$

– в перерізах вхідних та вихідних патрубків задавалась однорідна швидкість води, та однорідна температура води;

– фізичні властивості води:

– вираз для зміни густини води з температурою за рекомендаціями N.Elkouh:

$$\rho_1 = \rho_m (1 - \alpha \cdot |T_w - T_m|^q) \quad (11)$$

Це співвідношення дійсне між 0°C і 20°C. Точність визначення теплофізичних властивостей є однією з умов достовірності моделювання. Між 0 °C і 20 °C – масова густина води змінюється лише на 0,18 %, але одночасно її динамічна в'язкість зменшується на 43,7 %, її теплопровідність збільшується на 5,6 %, її питома теплоємність зменшується на 0,50 %, а отримане число Прандтля зменшується на 47 %, переходячи з 13,3 до 7,0. Тому нехтування змінністю фізичних властивостей навіть в такому вузькому діапазоні температур може призвести до помилок в результатах моделювання. Чисельне дослідження процесів перенесення виконано на основі моделі турбулентності *Standard k-ε*, *Standard k-ω*, *SST k-ω* за прийнятої умови ізотропного турбулентного потоку (що, в цілому, можна вважати справедливим для низькошвидкісної змішаної течії) та застосовуватимемо для чисельного дослідження.

В загальному вигляді, використані в цих моделях додаткові транспортні рівняння для осереднених за Рейнольдсом моментів можна записати у вигляді:

$$\rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} + \rho \bar{u}_j \frac{\partial \Phi}{\partial x_j} = P - D + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \Gamma_\Phi) \frac{\partial \Phi}{\partial x_j} \right] + A \quad (12)$$

Моделльні коефіцієнти для моделей з двома диференціальними транспортними рівняннями наведені в табл. 1.

Для верифікації моделі було проведене CFD-моделювання процесів перенесення нестационарного вільноконвективного перенесення в об'ємі, відповідному експериментальній секції. Фізико-математична модель відповідала попередньо сформульованій. Аналізувались два випадки: початкова середньомасова температура рідини дорівнює температурі інверсії густини $T_0 = 4^\circ\text{C}$ ($T_m^* = 1,0$) та температура холодної поверхні $T_0 = 0^\circ\text{C}$; початкова середньомасова температура рідини задавалась вищою температури інверсії густини $T_0 = 10^\circ\text{C}$ (параметр інверсії $T_m^* = 0,4$) та температура холодної поверхні $T_0 = 0^\circ\text{C}$.

Таблиця 1. Моделльні коефіцієнти

k – ε	$c_{\varepsilon 1}$	$c_{\varepsilon 2}$	σ_k	σ_ε	c_μ
	1.44	1.92	1.0	1 0,3	0.09
k – ω	β_1^*	β_1	α	σ_k	σ_ω
	0.09	0.075	5/9	0.5	0.5
k – ω (SST)	β_1^*	β_1	α_1	σ_{k1}	$\sigma_{\omega 1}$
	0.09	0.075	$\beta_1/\beta_1^* - \sigma_{\omega 1} k^2 / \sqrt{\beta_1^*}$	0.85	0.5
	β_2^*	β_2	α_2	σ_{k2}	$\sigma_{\omega 2}$
	0.09	0 0,828	$\beta_2/\beta_2^* - \sigma_{\omega 2} k^2 / \sqrt{\beta_2^*}$	1	0.856

У випадку SST k-ω моделі останній член попереднього рівняння

$$A = 2(1 - F_1) \rho \omega^2 \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (13)$$

На рис. 6 наведені поля швидкості в початковий період процесу ($t = 50$ с.) та під час розвиненої конвекції ($t = 600$ с. для $T_0 = 4$ °C та $t = 6000$ с. для $T_0 = 10$ °C).

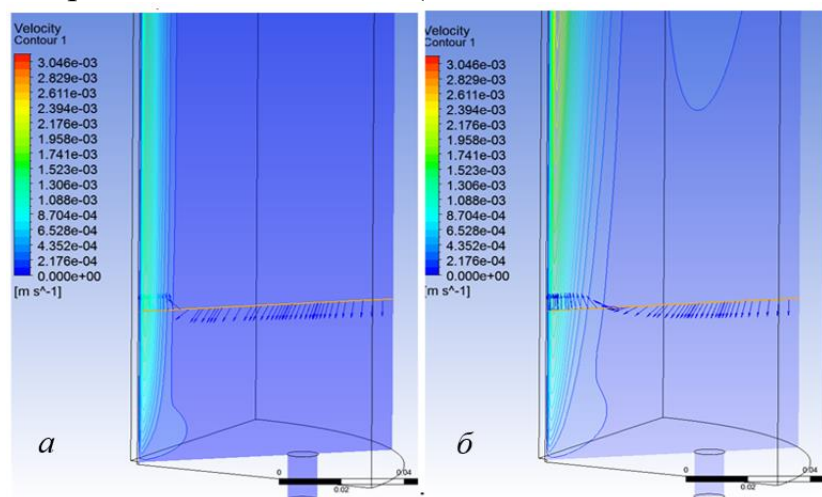


Рис. 6. Поле швидкості під час природної конвекції
 а – $T_m=4$ C, 50 сек. симуляції, б – $T_m=4$ C, 650 сек. симуляції.

Для $T_m^* > 1,0$, як і очікувалось, поле швидкості протягом чисельного експерименту мало один контур циркуляції. Це пов'язане з тим, що в межах температур $0...4$ °C зміна температури пропорційна зміні густини води. Водночас, очевидно, напрям циркуляції протилежний випадку вільноконвективного руху рідини без інверсії густини.

Для $T_m^* < 1,0$ спостерігаються два контури циркуляції, що обертаються в протилежних напрямках, як і очікувалось для цієї фізичної ситуації, коли діапазон температур містить точку інверсії густини. Причому, із збільшенням T_m^* границя контурів зміщується в протилежну від охолоджуючої поверхні сторону. Коли T_m^* досягає значення $T_m = 1,0$, циркуляція стає одноконтурною.

Межа контурів циркуляції відповідає ізотермічній поверхні $T = 4$ °C (ізотерма точки інверсії густини), що підтверджує ефект інверсії густини в режимі домінування природної конвекції. Схема потоку повністю залежить від значень параметра інверсії щільності. Структура потоку змінюється від одноконтурного до двоконтурного при зміні параметра інверсії від 0 до 1.

Цей висновок підтверджується аналізом поля температури (рис.7).

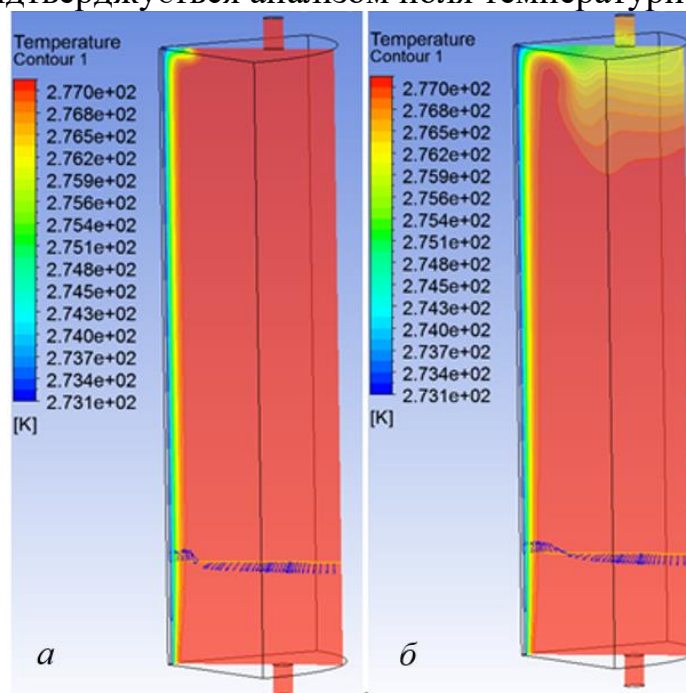


Рис. 7. Поле температури під час природної конвекції:
 а – $T_m=4$ °C, 50 сек. симуляції, б – $T_m=4$ C, 650 сек. Симуляції.

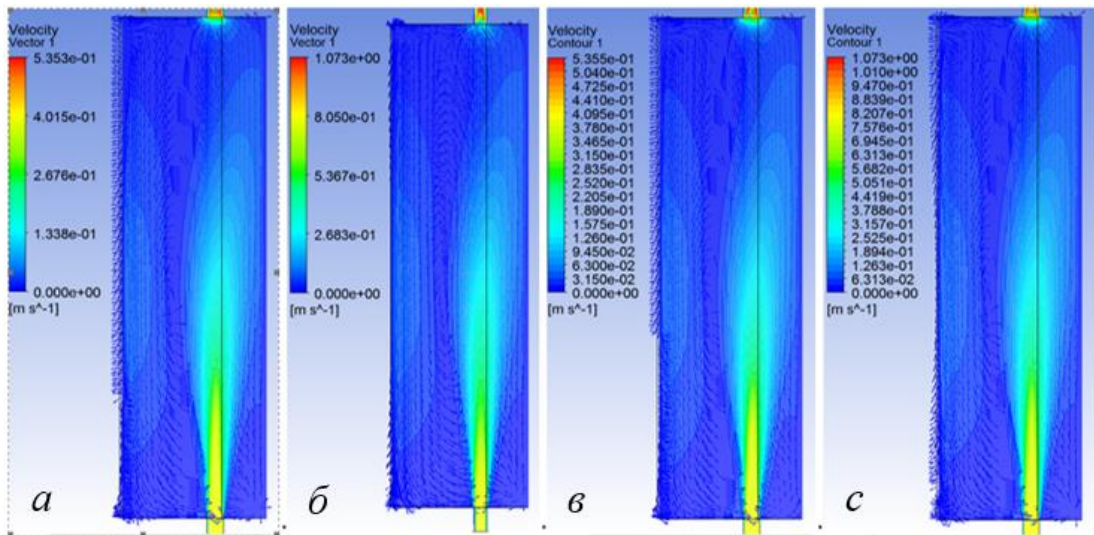


Рис. 8. Поля швидкості під час змішаної конвекції

$a - T_m=4C; Re=495; \delta - T_m=4C; Re=1205; \nu - T_m=10C; Re=495; c - T_m=10C; Re=1205$

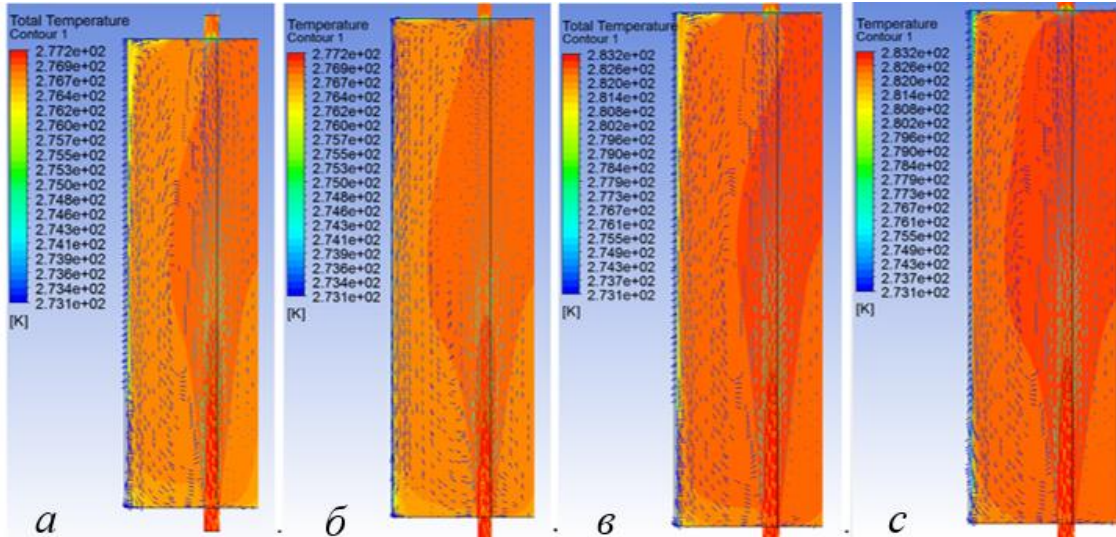
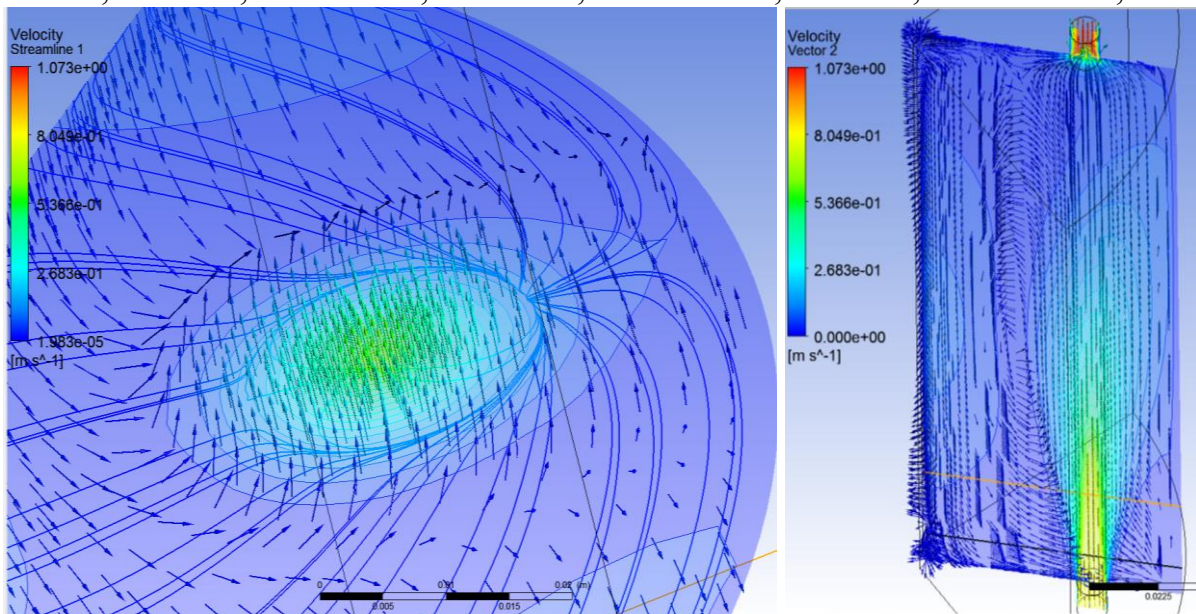


Рис. 9. Поля температур під час змішаної конвекції

$a - T_m=4C; Re=495; \delta - T_m=4C; Re=1205; \nu - T_m=10C; Re=495; c - T_m=10C; Re=1205$

Рис. 10. Профіль швидкості під час змішаної конвекції
 $T_m=10\text{ }^{\circ}C; Re=1205$, поперечний переріз $h=0,07m$.

На рис. 8-10 наведені поля швидкості та профілі швидкості пристінній області та в перерізі секції в цілому для різного співвідношення вільноконвективної та вимушеноконвективної складових змішаної конвекції.

Інший характер циркуляції рідини спостерігається під час змішаної конвекції:

А саме, під час змішаної квазістаціонарної конвекції, незалежно від значення T_m^* спостерігається три контури циркуляції, відносний розмір яких визначається співвідношенням вимушено- та вільноконвективних складових.

На сьогодні практично єдиним методом аналізу перенесення під час вільної конвекції для тих випадків, які піддаються прямому чисельного моделювання, є DNS та LES CFD-методи. Одночасно, сучасні дослідницькі RANS-моделі обходять необхідність задання турбулентного числа Прандтля, пов'язуючи турбулентну дифузю внутрішньої енергії з дисперсією активного скаляра (температури) і потім розв'язуючи додаткові транспортні рівняння перенесення для цієї дисперсії і швидкості її дисипації. Однак, ці моделі, внаслідок складності, реалізуються в дослідницьких цілях, та не передбачені для інженерного моделювання в комерційних кодах. Тобто, складність та недостатня вивченість фізичних засад процесу не дозволяє аналітично визначити турбулентне число Прандтля. А оскільки затухання турбулентності біля твердої поверхні одночасно впливає на взаємопов'язані векторне поле швидкості та активне скалярне поле температури, застосуємо принцип Ле Шательє-Брауна до визначення характеру зміни величини, що визначає співвідношення інтенсивностей турбулентного перенесення цих величин, а саме турбулентного числа Прандтля. Порівнюючи результати чисельного моделювання з результатами проведеного експериментального дослідження (порівнювались середні значення теплого потоку на поверхні льоду), отримали значення коефіцієнтів в рівнянні для Pr_t , що забезпечують адекватність результатів моделювання та результатів експерименту $C_1 = 3,5 \cdot 10^{-2}$; $C_2 = 0,25$.

Результуючий вираз для визначення турбулентного числа Прандтля:

$$Pr_t = Pr_{t\delta} + (Pr_{tcc} - Pr_{t\delta}) \cdot \exp\left[-3,5 \cdot 10^{-2} Ra_M^{0,25} \left(\frac{y}{\delta}\right)\right]. \quad (14)$$

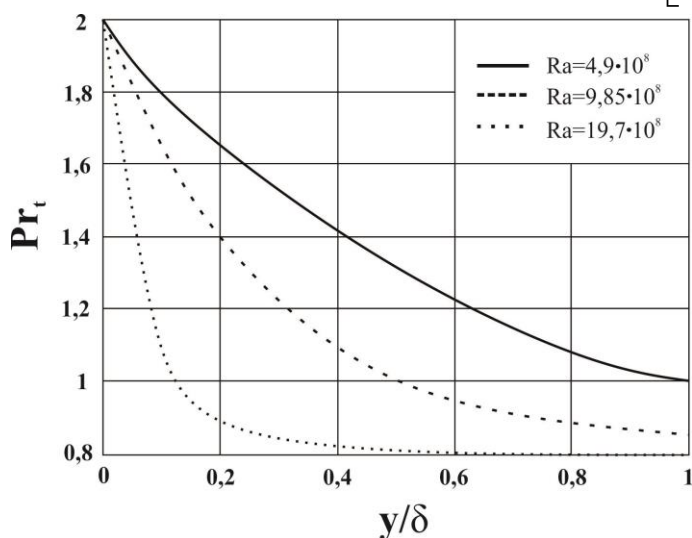


Рис. 11. Залежність $Pr_t=f(y/\delta)$

На рис. 11 наведене графічне зображення цього рівняння, яке свідчить про відповідність якісного характеру залежності $Pr_t f(y/\delta)$ результатам інших авторів.

На рис.12 наведене порівняння розрахунків за SST k- ω моделлю з використанням розробленої моделі Pr_t та визначених експериментально значень інтенсивності тепловіддачі.

Валідація результатів моделювання засвідчила, що застосування розробленої моделі турбулентного аналога числа Прандтля в «SST k- ω » моделі теплогідродина-

мічного розрахункового CFD-паketу на базі коду ANSYS CFX дозволила отримати задовільну відповідність результатів розрахунку теплообміну дослідним даним під час розв'язання задачі змішаної конвекції води поблизу точки інверсії в обмеженому просторі.

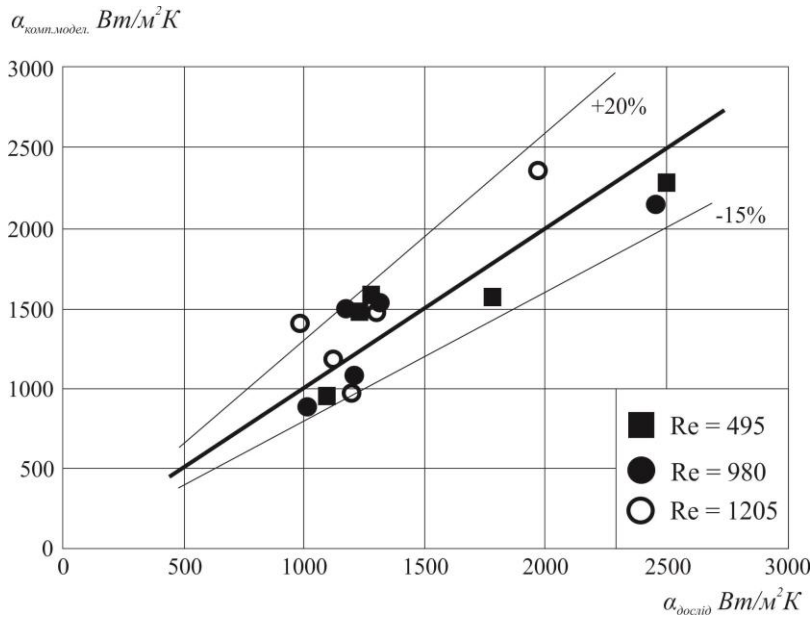


Рис. 12. Порівняння розрахованих за скоригованою SST $k-\omega$ моделлю та експериментально визначених значень інтенсивності теплообміну.

В п'ятому розділі запропоновано використовувати оптимізаційну стратегію керування системи зберігання низькопотенціальної енергії CTES на основі льоду ITES (Ice Thermal Energy Storage) в умовах динамічної зміни вартості електроенергії. При розробленні відповідних оп-

тимізаційних моделей, сформульовано критерії оптимізації, які об'єктивно оцінюють сенс використання ITES в складі системи холодопостачання.

Проведено термодинамічний аналіз систем CTES. Він придатний для досягнення мети щодо більш ефективного використання енергоресурсів, оскільки він дозволяє визначити місце, типи та дійсну величину відходів та втрат. Тобто, термодинамічний аналіз може показати, чи можна і як створити більш ефективний дизайн системи охолодження за рахунок зменшення неефективності існуючих систем.

Процес заряджання накопичувача (Charging Process)

Протягом періоду заряджання загальний "холод" (заряд), Q_c , що подається в систему накопичення тепла, може бути виражений як

$$Q_c = m_c c_p (T_{c,o} - T_{c,i}) = m_{ict} (c_p T_l + \lambda + c_{p,ice} T_{ict,m}), \quad (15)$$

де c_p , $T_{c,i}$, $T_{c,o}$ – питома теплоємність і розрахункові температури холодоносія на вході і на виході під час заряджання, відповідно; m_{ict} – кількість (кг/с) накопиченого льоду, T_l – температура води, що поступила на льодоутворення, λ – теплота плавлення льоду, $c_{p,ice}$, $T_{ict,m}$ – теплоємність та середня температура льоду, відповідно. Термін m_c представляє деяку витрату холодоносія за період заряджання, t_c (s), і може бути записаний як

$$m_c = \int_0^{t_c} m(t_c) dt_c, \quad (16)$$

де $m(t_c)$ – масова витрата рідини, кг/с.

Для постійної витрати рідини

$$m_c = m \cdot t_c. \quad (17)$$

Загальна ексергія, заряджена в систему накопичення тепла під час зарядки, визначається як

$$Ex_{Q,c} = m_c c_p [(T_{c,o} - T_{c,i}) - T_0 \ln(T_{c,o}/T_{c,i})]. \quad (18)$$

Процес зберігання (Storing Process)

У процесі зберігання система накопичення тепла (для охолоджувальних систем) отримує тепло (або втрачає "холод") завдяки енергетичній взаємодії між системою та довкіллям. Ця взаємодія в основному відбувається через передачу тепла на границях системи, оскільки температура зберігання (T_s) нижча, ніж температура навколишнього середовища (T_0)

$$Q_l = k F (T_0 - T_s), \quad (19)$$

де k та F – осереднений коефіцієнт теплопередачі та площа поверхні теплообміну з довкіллям, відповідно.

Загальні втрати ексергії (зовнішні) від системи накопичення тепла в процесі накопичення визначаються як

$$Ex_{Q,l} = Q_l (1 - T_s/T_0). \quad (20)$$

Процес розрядження (Discharging Process)

Протягом періоду розрядження отримана кількість холоду, Q_d , що забезпечується системою акумулювання холоду

$$Q_d = m_d c_p (T_{d,i} - T_{d,o}) = m_{ict} (\lambda + c_{p,ice} T_{ict,m}), \quad (21)$$

де c_p , $T_{d,i}$ та $T_{d,o}$ – питома теплоємність, температура холодоносія на вході та на виході, відповідно. Термін m_d представляє загальну витрату холодоносія за період розрядження t_d (s), і може бути записаний як

$$m_d = m t_d. \quad (22)$$

Загальна ексергія, що відводиться із системи накопичення тепла під час процесу скидання, визначається як

$$Ex_{Q,d} = m_d c_p [(T_{d,i} - T_{d,o}) - T_0 \ln(T_{d,i}/T_{d,o})]. \quad (23)$$

Ефективність використання енергії та ексергії

Енергоефективність системи накопичення тепла можна оцінити за весь робочий цикл (зарядження, зберігання та розрядження) як співвідношення загальної кількості «холоду», відновленого із системи під час процесу розрядження (Q_d) до загальної кількості «холоду», зарядженого в систему (Q_c). Це можна виразити як

$$\eta = Q_d / Q_c. \quad (24)$$

Подібним чином ефективність ексергії системи може бути оцінена як

$$\Psi = Ex_{Q,d} / Ex_{Q,c}. \quad (25)$$

Розглянуто елементарний приклад з наступними припущеннями:

Поверхні накопичувача є неадіабатичними (втрати в довкілля – 10%). Масова витрата холодоносія регулюється таким чином, щоб забезпечувати постійну температуру на вході та виході. $T_{c,o} = 10$ °C, $T_{d,o} = 5$ °C, $T_{c,i} = -1$ °C; $T_{d,i} = 15$ °C. Умови навколишнього середовища (T_0 і P_0) становлять 20 °C і 1 атм. В результаті загальна енергоефективність та ексергетична ефективність складуть $\eta = 90$ %, $\psi = 28$ %. Очікувано, отримане високе значення енергоефективності та значно нижче значення термодинамічної (ексергетичної) ефективності.

ВИСНОВКИ

Результатом дисертаційного дослідження є вирішення наукової задачі, що дозволяє на основі комплексних теоретичних та експериментальних досліджень процесів теплообміну і гідродинаміки під час танення водяного льоду при змішаному режимі конвекції, розробити теоретичні та практичні засади розрахунку акумулюю-

рів холоду з фазовими перетвореннями та напівемпіричні залежності для розрахунку інтенсивності теплообміну під час танення водяного льоду.

1. Експериментально досліджено процеси динаміки танення льоду в діапазоні зміни температури кипіння холодоагенту в межах $-10\dots-25$ °C та температури води в діапазоні $1\dots10$ °C.

2. Експериментально досліджено процеси теплообміну при вільній конвекції в обмеженому просторі, ускладненої слабokonвективним потоком холодоносія під час танення льоду.

3. Запропоновано кореляційну залежність для узагальнення результатів досліджень з інтенсивності тепловіддачі під час танення льоду в умовах змішаної конвекції в обмеженому просторі у вигляді суперпозиції механізмів природної та вимушеної конвекції на основі принципу Ле Шательє-Брауна з використанням «зональної температури» як визначально.

4. Розроблені розрахункові залежності для визначення інтенсивності теплообміну під час змішаної турбулентної та перехідної конвекції у замкненій порожнині, що адекватно описують результати експериментального дослідження.

5. Проведено комплексний статистичний аналіз результатів експериментального дослідження процесів теплообміну під час танення льоду на базі розроблених систем безрозмірнісних чисел подібності, результати якого дозволили зробити висновок про їх достатню верифікацію.

7. Запропонована методика CFD-моделювання дозволила верифікувати «Standard k- ϵ », «Standard k- ω » та «SST k- ω » моделі турбулентності на базі коду ANSYS CFX для чисельного моделювання процесів перенесення відповідно до умов змішаної конвекції води поблизу точки інверсії в обмеженому просторі з достатньою точністю та прийнятними часовими витратами. Програмна реалізація моделі достатньо точно відображає прийняту розробником концептуальну модель і відповідне даній моделі рішення.

9. Аналіз полів швидкості, температури та турбулентної кінетичної енергії дозволив верифікувати розроблену модель на відповідність сучасним уявленням про фізичний перебіг процесів перенесення механічної та внутрішньої енергії під час вільної та змішаної конвекції.

10. На основі принципу Ле Шательє-Брауна розроблена модель зміни турбулентного аналога числа Прандтля в зоні затухання турбулентності поблизу твердої поверхні в умовах змішаної конвекції води поблизу точки інверсії в обмеженому просторі і показано, що корекція турбулентного аналога числа Прандтля без зміни стандартних модельних коефіцієнтів в «SST k- ω » моделі турбулентності дозволяє отримати адекватну чисельну модель теплообміну під час змішаної конвекції у воді з переважаючим впливом ефекту плавучості.

11. Розроблено функцію оптимізації керування CTES, що базується на принципі підсумування витрат.

12. Розроблено алгоритм врахування часткового навантаження та параметрів довкілля на ефективність роботи обладнання CTES.

13. Запропоновано спрощену інженерну методику аналізу термодинамічної ефективності CTES.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях України та закордонних періодичних виданнях, які індексуються у міжнародних наукометричних базах:

1. Experimental and Theoretical Study of Ice Formation on Vertical Cooled Pipes / R. Gryshchenko, Y. Zasiadko, O. Pylypenko, A. Forsiuk // *Ukrainian Food Journal*. – 2015. – V. 4, I. 3. – P. 494-507; **внесок автора:** участь у розробленні дослідної установки, проведення експериментального дослідження, опрацювання та узагальнення дослідних даних та підготовка матеріалів до публікації тез доповіді; **база(и):** *Web of Science, Google Scholar, Crossref, DRJI, EBSCO, Ulrichs Web, Cabi Full Text, ERIH PLUS, Directory of Open Access Scholarly Resources, Directory of Open Access Journals, InfoBase Index, CAS Source Index, FSTA.*

2. Про доцільність використання акумуляторів холоду на підприємствах / Грищенко Р.В., Форсюк А.В., Засядько Я.І., Пилипенко О.Ю. // *Холодильна техніка і технологія*. – 2015. – Т. 51, №. 6. – С. 12-16; **внесок автора:** аналітичний огляд літературних джерел, підготовка матеріалів до публікації; **база(и):** *Index Copernicus, Google Scholar, ResearchBib, EBSCOhost, AGRIS, Dimensions, Scilit, DORA, Бібліометрика Української науки, Crossref, Ulrichs Web, DOAJ, WorldCat, Національна бібліотека України ім. Вернадського, Shepre&RoMEO.*

3. A Study of Water Ice Formation and Melting Processes on Vertical Cooled Pipes / Gryshchenko R., Zasiadko Ya, Pylypenko O., Forsiuk A. // *Холодильна техніка і технологія*. – 2016. – Т. 52, №. 3. – С. 9-14; **внесок автора:** участь в теоретичному та практичному дослідженні, підготовка матеріалів до друку; **база(и):** *Index Copernicus, Google Scholar, ResearchBib, EBSCOhost, AGRIS, Dimensions, Scilit, DORA, Бібліометрика Української науки, Crossref, Ulrichs Web, DOAJ, WorldCat, Національна бібліотека України ім. Вернадського, Shepre&RoMEO.*

4. 3-D Modeling of Water Flow and Cooling Down Within the Temperature Range Close to Inversion Point / Gryshchenko R., Zasiadko Ya, Pylypenko O., Forsiuk A. // *Food and Environment Safety*. – 2016. – V. XV, I. 4. – P. 323-328; **внесок автора:** участь в теоретичному та практичному дослідженні, підготовка матеріалів до друку; **база(и):** *Index Copernicus, Directory of Open Access Journals, Ulrichs Web, CAS, Journal Seek, EBSCO.*

5. Тривимірне моделювання нестационарного теплообміну під час охолодження води / Грищенко Р.В., Засядько Я.І., Форсюк А.В., Пилипенко О.Ю. // *Холодильна техніка та технологія*. – 2017. – Том 53 Випуск 6. – P. 59-63; **внесок автора:** участь в розробленні математичної моделі, проведення тривимірного моделювання, підготовка матеріалів до публікації; **база(и):** *Index Copernicus, Google Scholar, ResearchBib, EBSCOhost, AGRIS, Dimensions, Scilit, DORA, Бібліометрика Української науки, Crossref, Ulrichs Web, DOAJ, WorldCat, Національна бібліотека України ім. Вернадського, Shepre&RoMEO.*

6. Advisability use of Arduino controllers in automation of refrigeration devices / Грищенко Р.В., Засядько Я.І., Голуб О.В., Форсюк А.В., Пилипенко О.Ю. // *Холодильна техніка та технологія*. – 2019. – Том 55 Випуск 1. – P. 54-59; **внесок автора:** аналітичний огляд літературних джерел, підготовка матеріалу до друку та участь в конференції; **база(и):** *Index Copernicus, Google Scholar, ResearchBib, EBSCOhost, AGRIS, Dimensions, Scilit, DORA, Бібліометрика Української науки, Crossref, Ulrichs*

Web, DOAJ, WorldCat, Національна бібліотека України ім. Вернадського, Sherre&RoMEO.

7. Способи регулювання холодопродуктивності станцій з поршневыми компресорами / Р. В. Грищенко, О.М. Рябчук, М.М. Мирошник, В.О. Бойко В.А. Павліченко // Наукові праці НУХТ – 2020. – Том 26 Випуск 4. – С. 113-129; **внесок автора:** *аналітичний огляд літературних джерел, підготовка матеріалу до друку та участь в конференції; база(и): Index Copernicus, EBSCOhost, Google Scholar*

Статті та тези доповідей у збірниках праць міжнародних наукових конференцій:

8. Моделирование охлаждения и движения воды в программной системе мке анализа ANSYS / Р.В Грищенко, Я.И. Засядько, О.Ю. Пилипенко // Переработка и управление качеством сельскохозяйственной продукции : сборник статей III Международной. науч.-практической. конф., 23-24 марта 2017 г. – Минск: 2017. – С. 480-481; **внесок автора:** *участь в розробленні математичної моделі, проведення тривимірного моделювання руху води в замкненій порожнині, підготовка матеріалів до публікації.*

9. Грищенко Р.В., Експериментальне визначення швидкості танення льоду накопиченого на вертикальній трубі / Форсюк А.В., Пилипенко О.Ю. // Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті: 80 міжнародна наукова конференція молодих учених, аспірантів і студентів, 10-11 квітня 2014 р.: програма і матеріали конф.- К.:НУХТ, 2014. – Ч.2 - С. 338; **внесок автора:** *виконано послідовне проведення дослідів на різні режимні параметри роботи експериментальної установки.*

10. Грищенко Р.В., Установка для дослідження процесу танення льоду на вертикальній циліндричній поверхні / Форсюк А.В., Пилипенко О.Ю. // Стан, досягнення і перспективи холодильної техніки і технології: Міжнародна науково-технічна конференція молодих вчених та студентів, 22 квітня 2014р.: програма і матеріали конф.- О.: ОНАХТ, 2014. – С. 40-41; **внесок автора:** *участь у розробленні дослідної установки, проведення експериментального дослідження, опрацювання та узагальнення дослідних даних.*

11. Грищенко Р.В., 2D та 3D моделювання на основі пакету прикладних програм ansys для вирішення задач механіки рідини і газу, тепло- та масообміну / Форсюк А.В., Засядько Я.І. // Стан, досягнення і перспективи холодильної техніки і технології: Міжнародна науково-технічна конференція молодих вчених та студентів, 22 квітня 2014р.: програма і матеріали конф.- О.: ОНАХТ, 2014. – С. 40-41. **внесок автора:** *проведення тривимірного моделювання дослідної секції з різними режимами руху холодоносія.*

12. Грищенко Р.В., Вдосконалена установка дослідження процесу танення льоду на вертикальній циліндричній поверхні / Форсюк А.В., Засядько Я.І., О.Ю. Пилипенко // Нові ідеї в харчовій науці – нові продукти харчової промисловості. Міжнародна наукова конференція, присвячена 130-річчю Національного університету харчових технологій, 13-16 жовтня 2014 р. : програма і матеріали конф. – К. : НУХТ, 2014. –С. 541; **внесок автора:** *участь у розробленні дослідної установки, проведення експериментального дослідження, опрацювання та узагальнення дослідних даних.*

13. Грищенко Р.В., Первинні данні експериментального дослідження кристалізації та танення льоду на вертикальній трубі з безпосереднім охолодженням хладоном-22 / Форсюк А.В., Засядько Я.І., О.Ю. Пилипенко // Нові ідеї в харчовій науці – нові продукти харчової промисловості. Міжнародна наукова конференція, присвячена 130-річчю Національного університету харчових технологій, 13-16 жовтня 2014 р. : програма і матеріали конф. – К. : НУХТ, 2014. – С. 543; **внесок автора:** виконано послідовне проведення дослідів на різні режимні параметри роботи експериментальної установки.

14. Gryshchenko R.V., Experimental studies into the regularities of ice formation on vertical pipes / A.V. Forsiuk, Y.I. Zasyadko, O.Y. Pylypenko // 3rd North and East European Congress on Food «NEEFood-2015», 20-23 May 2015: Invitation and program – Brasov, Romania, 2015. – P. 9; **внесок автора:** розроблення методики дослідження, опрацювання та узагальнення дослідних даних та підготовка матеріалів до участі в конференції.

15. Грищенко Р.В., Динаміка кристалізації льоду на вертикальних охолоджувальних трубах / Форсюк А.В., О.Ю. Пилипенко // Проблемы промышленной теплотехники : IX Международная конференция, 20-23 октября 2015 г. программа конф. – К. Украина, 2015. – С. 7; **внесок автора:** участь в розробленні математичної моделі, підготовка матеріалів до публікації;

16. 3D моделювання охолодження води при температурах близьких до точки інверсії / Форсюк А.В., О.Ю. Пилипенко // Проблемы промышленной теплотехники : IX Международная конференция, 20-23 октября 2015 г. программа конф. – К. Украина, 2015. – С. 8; **внесок автора:** розробка тривимірної моделі руху води вздовж охолоджуваної поверхні, аналіз полів швидкості та температури.

17. Грищенко Р. Застосування акумуляторів холоду на підприємствах / Форсюк А. // Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті: 82 міжнародна наукова конференція молодих учених, аспірантів і студентів, 13-14 квітня 2016 р.: програма і матеріали конф.- К.:НУХТ, 2016. – Ч.2 - С. 223; **внесок автора:** аналітичний огляд літературних джерел, підготовка матеріалів до публікації.

18. Грищенко Р.В. Моделювання руху води при температурах близьких до точки інверсії / Засядько Я. // Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті: 82 міжнародна наукова конференція молодих учених, аспірантів і студентів, 13-14 квітня 2016 р.: програма і матеріали конф.- К.:НУХТ, 2016. – Ч.2 - С. 224; **внесок автора:** проведення тривимірного моделювання природної конвекції в дослідній секції, підготовка матеріалів до публікації.

19. Gryshchenko R. Experimental and Theoretical Study of Ice Formation on Vertical Cooled Pipes / Zasiadko Y., Pylypenko O., Forsiuk A. // 8th Central European Congress on Food 2016 – Food Science for Well-being, 23-26 May 2016 : Book of abstract, - Kyiv, Ukraine 2016. – P. 41; **внесок автора:** розроблення методики дослідження, опрацювання та узагальнення дослідних даних та підготовка матеріалів до участі в конференції.

20. Gryshchenko R. 3D Simulation of Water Cooling / Pylypenko O., Forsiuk A. // 8th Central European Congress on Food 2016 – Food Science for Well-being, 23-26 May 2016 : Book of abstract, - Kyiv, Ukraine 2016. – P. 45; **внесок автора:** запропонована

методика CFD-моделювання на базі коду ANSYS CFX для чисельного моделювання процесів перенесення відповідно до умов змішаної конвекції води.

21. Gryshchenko R. Dynamics of Ice Formation on Vertical Pipes / Pylypenko O., Forsiuk A. //8th Central European Congress on Food 2016 – Food Science for Well-being, 23-26 May 2016 : Book of abstract, - Kyiv, Ukraine 2016. – P. 107; **внесок автора:** аналітичний огляд літературних джерел, підготовка матеріалів до публікації.

22. Грищенко Р.В. Тривимірне моделювання нестационарного теплообміну в акумуляторах теплової енергії / Засядько Я.І., Пилипенко О.Ю., Колодзінський Р.І. // научно-техническая конференция «Современные проблемы холодильной техники и технологии», 21-22 вересня 2017. – Одеса. : ОНАХТ, 2017. – С. 50-52; **внесок автора:** проведено CFD-моделювання процесів перенесення нестационарного вільноконвективного перенесення в об'ємі, відповідному експериментальній секції.

23. Грищенко Р.В. Первинні експериментальні дані льодоутворення на вертикальній трубі за її безпосереднього охолодження та вільної конвекції води / Засядько Я.І., Пилипенко О.Ю., Колодзінський Р.І. // XI международная научно-техническая конференция «Современные проблемы холодильной техники и техно логии», 21-22 вересня 2017. – Одеса. : ОНАХТ, 2017.– С. 53-54; **внесок автора:** розроблення методики дослідження, опрацювання та узагальнення дослідних даних.

24. Грищенко Р.В. Змішана конвекція у вертикальних каналах дослідної секції, акумулятора теплової енергії / Форсюк А.В., Василенко С.М., Пилипенко О.Ю. // Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у ХХІ столітті: 85 міжнародна наукова конференція молодих учених, аспірантів і студентів, 24-25 квітня 2019 р.: програма і матеріали конф.- К.:НУХТ, 2019. – Ч.2 - С. 304; **внесок автора:** аналітичний огляд літературних джерел, підготовка матеріалів до публікації.

25. Gryshchenko R.V. Heat exchange during ice melting in the cold storage device / Forsiuk A.V., Vasylenko S.M., Samielenko S.M., Pylypenko O.Yu. // X anniversary international scientific and technical conference Kazakhstan-refrigeration 2020, Proceeding of the Conference, March 4-5, 2020, Nur-Sultan, Kazakhstan – P.68-70; **внесок автора:** розроблено функцію оптимізації керування CTES.

26. Gryshchenko R.V. Analysis of energy efficiency of cold storage units / Forsiuk A.V., Vasylenko S.M., Samielenko S.M., Pylypenko O.Yu // X anniversary international scientific and technical conference Kazakhstan-refrigeration 2020, Proceeding of the Conference, March 4-5, 2020, Nur-Sultan, Kazakhstan – P.66-68; **внесок автора:** запропоновано спрощену інженерну методику аналізу CTES.

АНОТАЦІЯ

Грищенко Р.В. Динаміка танення льоду в елементах акумуляторів енергії, систем охолодження та кондиціонування повітря. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.06 – технічна теплофізика та промислова теплоенергетика. – Національний університет харчових технологій МОН України, Київ, 2021.

У дисертаційній роботі наведені результати комплексного теоретичного та експериментального дослідження процесів теплообміну і гідродинаміки у воді під час танення льоду при змішаному режимі конвекції з переважаючими ефектами

плавучості. Науково обґрунтовано та розроблено методики розрахунку процесів теплообміну з метою отримання напівемпіричних залежностей для розрахунку інтенсивності теплообміну у воді під час танення льоду. Запропоновано використовувати принцип Ле Шательє-Брауна для розроблення загального вигляду розрахункової кореляційної залежності у вигляді суперпозиції механізмів природної та вимушеної конвекції.

Розроблені розрахункові залежності для визначення інтенсивності теплообміну під час змішаної турбулентної та перехідної конвекції у замкненій порожнині, що адекватно описують результати експериментального дослідження.

Запропонована методика CFD-моделювання, що дозволила верифікувати «Standard k- ϵ », «Standard k- ω » та «SST k- ω » моделі турбулентності на базі коду ANSYS CFX для чисельного моделювання процесів перенесення відповідно до умов змішаної конвекції води поблизу точки інверсії. Аналіз результатів моделювання засвідчив, що застосування розробленої моделі турбулентного аналога числа Прандтля в «SST k- ω » моделі теплогідродинамічного розрахункового CFD-паketу на базі коду ANSYS CFX дозволила отримати задовільну відповідність результатів розрахунку теплообміну дослідним даним під час розв'язання задачі змішаної конвекції води поблизу точки інверсії в обмеженому просторі. Запропоновано спрощену інженерну методику аналізу термодинамічної ефективності CTES.

Ключові слова: змішаний режим конвекції, ефект плавучості, інверсія густини води, теплообмін, гідродинаміка, лід, льодяна вода, акумулятори енергії, тривимірне комп'ютерне моделювання, ansys, cfx, системи CTES та ITES

ABSTRACT

Gryshchenko R.V. Dynamics of ice melting in the elements of energy accumulators, system cooling and air conditioning. – The manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of the candidate of technical sciences on a specialty 05.14.06 - technical thermophysics and industrial heat power engineering. - National University of Food Technologies, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2021.

In the dissertation work the results of complex theoretical and experimental research of processes of heat exchange and hydrodynamics in water during ice melting at the mixed mode of convection with prevailing effects of buoyancy are resulted. Scientifically substantiated and developed methods for calculating heat transfer processes in order to obtain semi-empirical dependences for calculating the intensity of heat transfer in water during ice melting. It is proposed to use the Le Chatelier-Brown principle to develop a general form of the calculated correlation dependence in the form of a superposition of the mechanisms of natural and forced convection.

Calculated dependences for determination of heat exchange intensity during mixed turbulent and transient convection in a closed cavity are developed, which adequately describe the results of experimental research.

The proposed CFD-modeling technique, which allowed to verify the "Standard k- ϵ ", "Standard k- ω " and "SST k- ω " turbulence models based on the ANSYS CFX code for numerical simulation of transfer processes according to the conditions of mixed water convection near the inversion point. Correction of the turbulent analogue of the Prandtl

number without changing the standard model coefficients in the "SST k- ω " model of turbulence allows to obtain an adequate numerical model of heat transfer during mixed convection in water with the predominant effect of buoyancy.

Analysis of the simulation results showed that the application of the developed model of turbulent analogue of Prandtl number in "SST k- ω " model of thermohydrodynamic calculated CFD-package based on ANSYS CFX code allowed to obtain satisfactory correspondence of heat exchange calculation results to experimental data. inversion points in a confined space. Namely, during mixed quasi-stationary convection, regardless of the value of T_m^* (density inversion parameter), three circulation circuits are observed, the relative size of which is determined by the ratio of forced and free convective components. One circulation circuit is generated by a reversible boundary layer of natural convection near the cooling surface. The other two circulation circuits are generated by a flooded fluid jet around the surface of its symmetry.

It should be noted that the symmetry surface of the flooded liquid jet is obviously characterized by a maximum velocity. And since, the values of the liquid velocity extremes correspond to the zero values of shear stresses and, obviously, they are characterized by the minimum values of the value of turbulent kinetic energy. Analysis of TKE profiles can be concluded that its production is determined, first of all, as expected, by the forced convective component of motion. The maximum values of TKE are observed in the area of the flooded liquid jet. Near hard surfaces outside the jet, the value of TKE goes to zero. That is, the processes of transfer under the action of buoyancy forces are realized mainly due to the viscosity mechanism. This means that, as expected, the modes of fluid motion due to the buoyancy forces near solid surfaces are not turbulent, but transitional from laminar to turbulent (transient flow).

Also in the work the function of optimization of the managed CTES based on the principle of summation of expenses is developed. An algorithm for taking into account partial load and environmental parameters on the efficiency of CTES equipment has been developed.

Keywords: *mixed convection mode, buoyancy effect, water density inversion, heat transfer, hydrodynamics, ice, ice water, energy accumulators, three-dimensional computer simulation, ansys, cfx, CTES and ITES systems*