

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ТЕХНІЧНОЇ ТЕПЛОФІЗИКИ

КОНИК АЛІНА ВАСИЛІВНА



УДК 536.421+536.63

**ТЕПЛОФІЗИЧНІ ОСНОВИ СИСТЕМ ДИСКРЕТНОГО ОПАЛЕННЯ З
ЗАСТОСУВАННЯМ ТЕПЛОВИХ АКУМУЛЯТОРІВ ЄМНІСНОГО
ТИПУ**

Спеціальність 05.14.06 - технічна теплофізика та промислова
теплоенергетика

РЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Київ – 2026

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті технічної теплофізики НАН України, м. Київ.

Науковий консультант:

член-кореспондент Національної академії наук України, доктор технічних наук, професор
Авраменко Андрій Олександрович,
Інститут технічної теплофізики НАН України,
заступник директора з наукової роботи;

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, старший науковий співробітник
П'яних Костянтин Євгенович,
Інститут газу НАН України,
завідувач відділом технологій альтернативних палив;

доктор технічних наук, професор
Туз Валерій Омелянович,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені
Ігоря Сікорського»,
завідувач кафедри атомних електричних станцій і
інженерної теплофізики;

доктор технічних наук, професор
Петренко Валентин Петрович,
Національний університет харчових технологій,
завідувач кафедри теплоенергетики та
холодильної техніки.

Захист відбудеться «12» лютого 2026 р. о 11-00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.224.01 Інституту технічної теплофізики Національної академії наук України за адресою: м. Київ, вул. М. Капніст, 2а.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Інституту технічної теплофізики НАН України за адресою: м. Київ, вул. М.Капніст, 2а та на сайті <http://itf.kiev.ua/specializovani-vcheni-radi-2026>

Реферат розісланий „12” січня 2026 р.

Вчений секретар

спеціалізованої вченої ради Д 26.224.01

член-кореспондент НАН України

доктор технічних наук, професор



Ж.О. Петрова

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Обґрунтування вибору теми дослідження. Постачання теплової енергії без трубним способом є новим напрямком в системі теплозабезпечення, де в якості акумуляційного обладнання застосовуються мобільні теплові акумулятори (МТА). Розробленням МТА (Mobile thermal energy storage, M-TES) активно займаються вчені Німеччини (Інститут Fraunhofer UMSICHT, дослідницький центр ZAE Bayern), Швеції (LSG Sky Chefs), КНР (Qingdao Aohuan New Energy Group Co, Zhongyineng (Beijing) Technology Co), Японії та інших країн з розвинутою економікою.

Мобільний спосіб транспортування теплової енергії має низку переваг, таких як:

- енергетична ефективність, яка зумовлена застосуванням скидної теплоти підприємств для заряджання МТА; у якості споживача можуть бути як віддалені об'єкти, так і об'єкти з аварійним станом трубопроводу;

- екологічна ефективність, що ґрунтується на застосуванні у якості джерела живлення МТА об'єктів відновлювальної енергетики, вторинних енергетичних відходів, спалюванні відходів сільськогосподарських господарств, тощо.

В МТА переважно застосовують термохімічний метод при акумуляції з високим запасом теплоти та матеріали з фазовим переходом (phase change material, PCM) для низькопотенціального акумулювання.

Основним робочим тілом МТА є теплоакумуючі речовини, акумуляційна здатність яких забезпечує теплову потужність обладнання. Їх теплофізичні властивості в залежності від температури акумуляції визначають теплову продуктивність обладнання, робочий діапазон температур і відстань можливого транспортування теплової енергії. Склад акумуляційних речовин є предметом комерційної таємниці і об'єктом постійного вдосконалення.

Однак, обмежувачими факторами для широкого застосування МТА є агресивність теплоакумуючих рідин та діапазон робочих температурних режимів МТА, які в межах міської забудови мають бути врегульовані на державному рівні, що істотно обмежує вибір таких рідин.

Принцип дії та конструктивні особливості МТА є індивідуальними рішеннями, що зумовлені вибором джерела і відстанню транспортування теплової енергії до споживача.

Для України транспортування теплової енергії за допомогою МТА має надзвичайне додаткове значення, що пов'язане з руйнуваннями викликаними військовими діями. Окрім прямого призначення, забезпечення теплом комунальних підприємств і віддалених приватних споживачів з'являється можливість забезпечити теплом нестационарні військові об'єкти, об'єкти критичної інфраструктури, також МТА можуть бути застосовані як аварійні системи теплопостачання, що надзвичайно важливо протягом щонайменше 6 місяців кожного року.

З огляду на вищезазначене, актуальність роботи полягає в необхідності створення концептуального підходу розвитку теоретичних і практичних засад транспортування теплової енергії мобільним способом, а саме з розробки систем дискретного опалення з застосуванням мобільних теплових акумуляторів, принцип дії яких ґрунтується на акумулюванні теплової енергії з залученням вибухо- і пожежобезпечних

теплоакумулюючих рідин і матеріалів з фазовим переходом в обмеженому діапазоні температур.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалася у відділі «Тепломасообмін та гідродинаміка в елементах теплоенергетичного устаткування» лабораторії «Процеси та технології теплозабезпечення» відповідно до з наукової тематики Інституту технічної теплофізики НАН України. Робота пов'язана з науковими дослідженнями в межах наступних тем: «Розроблення системи зберігання та мобільного транспортування теплової енергії» за договором № ДЗ / 80-2019 від 25 вересня 2019 р. та додатковою угодою №1 від 02 березня 2020 р. (№ДР 0119U103145); «Розвиток наукових засад теплової взаємодії будівлі з довкіллям та підвищення її енергоефективності на основі застосування інтелектуальних систем енергозбереження» (№ДР 0120U101228); «Розроблення і оптимізація енергозберігаючих систем геотермальної вентиляції для енергоефективних будинків» (№ДР 0120U101263).

Метою дисертаційної роботи є розвиток теплофізичних засад теорії процесів мобільного теплового акумулювання та їх апробація в реальних умовах роботи мобільного теплового акумулятору МТА-0,5МВт.

Для досягнення поставленої мети в роботі було сформульовано і вирішено наступні **задачі досліджень**:

1. На основі аналізу літературних джерел встановити основні технічні параметри застосування низькопотенційного мобільного теплового акумулювання та дослідити теплофізичні властивості теплоакумулюючих рідин, що в них застосовуються.

2. Розробити теоретичне підґрунтя тепломасообмінних та гідродинамічних процесів мобільного теплового акумулювання для визначення основних технологічних параметрів мобільного теплового акумулятора, а саме:

- аналітично дослідити процес теплообміну всередині «теплового ядра» заповненого теплоакумулюючим матеріалом в умовах фазового переходу першого роду для визначення швидкості і часу нагріву матеріалу з фазовим переходом;
- розвинути теорію радіаційно-конвективного теплообміну при плівковому кипінні рідини на вертикальній нагрітій поверхні в стаціонарному та нестаціонарному режимах з метою визначення ефективних температурних параметрів акумулюючого процесу;
- розвинути нестаціонарну модель осцилюючого потоку рідини у плоских та циліндричних каналах з пористим середовищем для оцінки впливу характеру руху теплоносія при зміні його витрати.

3. Створити вибухо- і пожежобезпечне робоче тіло мобільного теплового акумулятору, а саме теплоакумулюючу рідину на основі водорозчинних полімерів рослинного походження.

4. Дослідити зв'язок наноструктур теплоакумулюючої рідини із застосуванням дворівневої моделі формування багатокомпонентних наноструктур.

5. На основі експериментальних досліджень визначити параметри теплофізичних характеристик теплоакумулюючої рідини.

6. Дослідити на основі теоретичних і експериментальних досліджень доцільність застосування теплоакумулюючих матеріалів при фазовому переході (плавленні / затвердінні) в теплому акумуляторі ємнісного типу.

7. Розробити концепт мобільного транспортування теплової енергії з застосуванням мобільних теплових акумуляторів нової конструкції з латентним зберіганням теплоти за допомогою безпечних теплоакумулюючих рідин і матеріалів з фазовим переходом.

Об'єкт досліджень – гідродинамічні та теплообмінні процеси в мобільному тепловому акумуляторі з залученням теплоакумулюючої рідини та теплоакумулюючих матеріалів при фазовому переході.

Предмет досліджень – теплові режими мобільного теплового акумулятору, теплофізичні параметри теплоакумулюючих рідин і матеріалів з фазовим переходом на процес акумуляції.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених задач було використано методи аналітичного та чисельного моделювання процесів складного теплообміну і гідродинаміки в мобільному тепловому акумуляторі МТА-0,5МВт та акумуляційних ємностях; проведено експериментальні дослідження теплофізичних властивостей теплоакумулюючих рідин і матеріалів при фазовому переході за допомогою відповідних методик досліджень, дослідницьких приладів та валідації отриманих даних з результатами моделювання; проведено дослідно-промислове випробування мобільного теплового акумулятора МТА-0,5МВт.

Експериментальні дослідження здійснювали на лабораторних стендах та дослідно-промислових установках, а саме:

- дослідження термоциклування теплоакумулюючої рідини та матеріалу з фазовим переходом здійснювали на лабораторному стенді «Для дослідження теплофізичних властивостей акумулюючих речовин та ефектів високотемпературної сорбції/десорбції»;
- дослідження акумуляції теплової енергії в реальних режимах проводили з застосуванням дослідного зразка мобільного теплового акумулятора МТА-0,5МВт на експериментальному стенді «Для комплексних досліджень ефективності системи накопичення та зберігання теплової енергії»;
- дослідження термоциклування теплоакумулюючої рідини та матеріалу при фазовому переході методом T-history.

При комплексних експериментальних дослідженнях теплоакумулюючої рідини і матеріалу з фазовим переходом в лабораторних умовах застосовували вимірювальні прилади:

- дослідження теплоємності зразків проводили за допомогою диференціального мікрокалориметру ДМКИ-1, ІТТФ НАН України;
- температура в потоці рідини вимірюється за допомогою напівпровідникового датчика DS18B20 (18B20) з'єданого з мікропроцесорним модулем «TRITON 6004TC» Науково-виробничого приватного підприємства "ТЕРЕКС";
- дослідження мікроструктури теплоакумулюючої рідини проводили за допомогою дослідницького мікроскопу просвічуючого і відбиваючого світла Axio Imager Carl Zeiss;
- вимірювання водневого показника і температури зразків проводили за допомогою рН-метра, HI 8424 HANNA-instruments.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків забезпечується використанням загальноприйнятих методик, що базуються на класичних ана-

літичних та чисельних методах. Проведено верифікацію отриманих в роботі експериментальних даних з результатами теоретичних досліджень. Точність і надійність результатів експериментальних досліджень зумовлена використанням сучасних вимірювальних приладів і засобів із застосуванням комп'ютерної обробки.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Вперше сформульовано теоретичні підходи на основі проведеного аналітичного та чисельного моделювання тепломасообмінних та гідродинамічних процесів мобільного теплового акумулювання для оптимізації конструкції мобільного теплового акумулятора, а саме:

- вперше аналітично досліджено процес теплообміну всередині «теплового ядра» заповненого матеріалом з фазовим переходом;

- розвинуто теорію радіаційно-конвективного теплообміну при плівковому кипінні рідини біля вертикальної нагрітої пластини. Досліджено стаціонарну та нестаціонарну задачі теплообміну з урахуванням, що остання описує миттєве (вибухове) кипіння рідини на нагрітій поверхні. Вперше отримано аналітичний розв'язок задач стаціонарного режиму для граничних умов, що мають постійну температуру стінки та постійний тепловий потік через стінку. В результаті вирішення нестационарної задачі отримано зміни профілів температури та коефіцієнта тепловіддачі у паровій плівці в залежності від часу. Показано вплив випромінювання (число Старка) на коефіцієнт тепловіддачі;

- розвинуто нестационарну модель осцилюючого потоку рідини у плоских та циліндричних каналах з пористим середовищем. Проведено порівняння аналітичних даних з чисельними результатами, одержаними за допомогою методу ґраток Больцмана. Показано, що поведінка осцилюючого потоку рідини при впливі осцилюючого градієнту тиску визначається двома безрозмірними параметрами – числами Струхаля та Дарсі.

2. Вперше досліджено теплофізичні властивості новоствореної вибухо- і пожежобезпечної теплоакumuлюючої рідини на основі водорозчинних полімерів протягом використання чотирьох опалювальних сезонів, а саме питомої теплоємності, термоциклічності, густини та водневого показника.

3. Вперше застосовано комбіновану модель, що об'єднує молекулярну динаміку та дисипативну динаміку частинок для моделювання взаємодії часток теплоакumuлюючої рідини.

Практична цінність отриманих результатів:

За результатами математичного моделювання і комплексних експериментальних досліджень створено систему дискретного опалення з застосуванням дослідного зразка мобільного теплового акумулятору. Дискретну систему опалення було застосовано вперше під час аварійних відключень в ІТТФ НАН України (м. Київ, вул. М. Капніст, 2а) та медико-реабілітаційному центрі МВС України «Кремінці» (с. Татарів, Івано-Франківська область).

Створено дослідний зразок мобільного теплового акумулятору МТА-0,5МВт, застосування якого дозволило забезпечити стале тепlopостачання в корпус медико-реабілітаційного центру МВС України «Кремінці» та заощадити 2700 кВт·год (13867 грн у грошовому еквіваленті) за опалювальний період 2022-2023 рр.

Оптимізовано конструкцію ємнісного акумулятора в якій застосовано три робочих тіла – теплоносії (вода), нова композиція теплоакumuлюючої рідини та ма-

теріал з фазовим переходом, що дозволило підвищити теплову акумуляцію і подолати теплову стратифікацію по висоті ємності.

За результатами математичного моделювання і комплексних експериментальних досліджень створено і застосовано нову вибухо- і пожежобезпечну композицію теплоакумулюючої рідини та підібрано відповідно до температурних режимів мобільного теплового акумулятору матеріал з фазовим переходом (плавлення / затвердіння), що дозволило підвищити теплове акумулювання до 56 % в МТА-0,5МВт.

Створено нову композицію теплоакумулюючої рідини на основі водорозчинних полімерів природного походження та експериментально досліджено її теплофізичні параметри, це дозволило встановити строк її експлуатації – не менше 2-4 років.

Результати математичного моделювання тепломасообмінних та гідродинамічних процесів мобільного теплового акумулювання використані в розробці методик освітніх програм бакалаврів і магістрів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського».

Особистий внесок здобувача. У роботах виконаних у співавторстві, автор брала активну участь у формуванні наукового напрямку досліджень, постановці задач, проведенні низки аналітичних, чисельних та експериментальних досліджень, в обробці одержаних результатів моделювання, доказі наукових положень, а також в проведенні експериментальних досліджень та їх обробці. Здобувач брала участь у формулюванні висновків і підготовці до публікації результатів дослідження.

Оглядові та порівняльні наукові результати, що викладені в дисертаційній роботі, отримані автором особисто, на основі проведення аналізу літературних та інформаційних джерел, а також результатів експериментальних даних.

Апробація результатів дисертації. Основні наукові, теоретичні положення та практичні результати дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на 15 науково-технічних конференціях, серед яких 9 міжнародних науково-технічних конференцій: XVII міжнародна науково-практична конференція студентів, аспірантів і молодих вчених "Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання", 25-26 листопада 2019 р. м. Київ, Україна; XVIII Міжнародна наукова конференція «Удосконалення процесів та обладнання харчових та хімічних виробництв», 12-16 жовтня 2020 р. м. Одеса, Україна; V International Scientific-Technical Conference «Actual problems of renewable Energy, construction And environmental engineering», 3 – 5 June 2021, Faculty of Environmental, Geomatic and Energy Engineering, Kielce University of Technology, Poland; «Проблеми теплофізики та теплоенергетики» XII Міжнар. онлайн-конф., 26-27 жовтня 2021 р. м. Київ, Україна; Actual problems of renewable energy, construction and environmental engineering, 24-27 November 2022, Faculty of Environmental, Geomatic and Energy Engineering Kielce University of Technology, Poland; XIII Міжнародна онлайн-конференція «Проблеми теплофізики та теплоенергетики» 7-8 листопада 2023, м. Київ, Україна; XXVI міжнародна науково-практична конференція студентів, аспірантів і молодих вчених "Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання", 16 травня 2024 р., м. Київ, Україна; XX міжнародна наукова конференція «Удосконалення процесів та обладнання харчових та хімічних виробництв», 9-13 вересня 2024 р., м. Одеса, Україна та ін.

Публікації. Основні положення та результати дисертаційної роботи викладено в 40 наукових працях, у тому числі: 8 статей, що входять до наукометричних баз Scopus і Web of Science, 9 публікацій в наукових журналах, що входять до переліку

фахових видань, 4 статті у виданнях, які включено до міжнародних наукометричних баз даних; 15 публікацій у збірниках матеріалів і тез конференцій, отримано 2 патенти України на винахід.

Структура та обсяг дисертаційної роботи. Дисертаційна робота складається з вступу, 7 розділів, висновків, переліку використаних джерел – 235 найменувань і додатків, що містять акти впровадження результатів роботи і додаткову технічну інформацію. Загальний обсяг роботи складає 386 сторінок, з них 288 основного машинописного тексту. Робота містить 105 рисунків, 20 таблиці і 9 додатків на 72 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі висвітлено актуальність теми дисертаційної роботи, визначено її зв'язок з науковими програмами, планами і темами, сформульовано мету і основні завдання досліджень, розглянуто об'єкт, предмет та методи досліджень, визначено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів. Наведено дані про апробацію результатів дисертаційної роботи. Наведено відомості про особистий внесок автора, опубліковані результати, структуру та обсяг роботи.

У першому розділі розглянуто сучасний стан проблем теплопостачання. Представлено загальну схему розвитку систем теплопостачання, зазначено етапи розвитку систем у історичному аспекті. Наведено основні характеристики кожного з етапів з описом проблем та методами їх вирішення, що виникали на кожному з них. Одним з пріоритетних напрямків, що виник у перехідному режимі від 4 до 5 етапів - транспортування теплової енергії альтернативними способами за допомогою мобільних теплових акумуляторів.

Проведено огляд мобільних систем накопичення теплової енергії в системах теплопостачання. Визначено основні способи акумуляції теплоти, що доцільно застосовувати при мобільному транспортуванні теплової енергії. Найбільш перспективними є термохімічний метод, що дозволяє забезпечити високу температуру акумуляції та застосування матеріалів з фазовим переходом при не високих температурних режимах до 150°C. З огляду на умови транспортування теплової енергії та відсутність відповідної законодавчої бази, було прийнято рішення обрати механізм акумуляції теплової енергії з застосуванням матеріалів з фазовим переходом.

Представлено огляд літературних джерел щодо застосування теплоакумуючих рідин (матеріалів) в мобільних теплових акумуляторах. Наведено теплофізичні характеристики та пріоритетність температурних режимів їх застосування. В результаті було обрано температурні режими теплоакумуючої рідини та матеріалу з фазовим переходом, що запропоновано використати у мобільному тепловому акумуляторі МТА-0,5МВт.

Описано механізм транспортування теплової енергії мобільним тепловим акумулятором МТА-0,5МВт, що є основним елементом в побудові гнучкої без трубної системи опалення. Пропонується створення нової системи теплопостачання – дискретної системи опалення, застосування якої особливо актуально при виникненні надзвичайних ситуацій в умовах військових дій. Основним елементом такої системи є мобільний тепловий акумулятор тепловою потужністю 0,5МВт, який є апаратом подвійного призначення, що транспортується переважно за допомогою автомобілів або будь-яким доступним видом транспорту.

МТА дозволяє залучити у якості джерела енергії – ВДЕ, ВТЕР, спалювання відходів сільськогосподарської діяльності або місцеві види палив, що є особливо актуальним з точки зору економіки і екології.

Споживачами дискретної системи опалення можуть бути як об'єкти критичної інфраструктури, так і приватний сектор, комунальні будівлі або військові об'єкти, що особливо важливо під час військових дій і виникненні надзвичайних ситуацій. Обґрунтовано актуальність створення мобільного теплового акумулятору та доцільність його застосування в умовах бойових дій та надзвичайних ситуацій, що базується на принципах тепломасообміну і гідродинаміки. В результаті аналізу літературних джерел та з урахуванням складного технологічного стану теплопостачання в Україні було сформульовано науково-технічну проблему представлену на рис. 1.

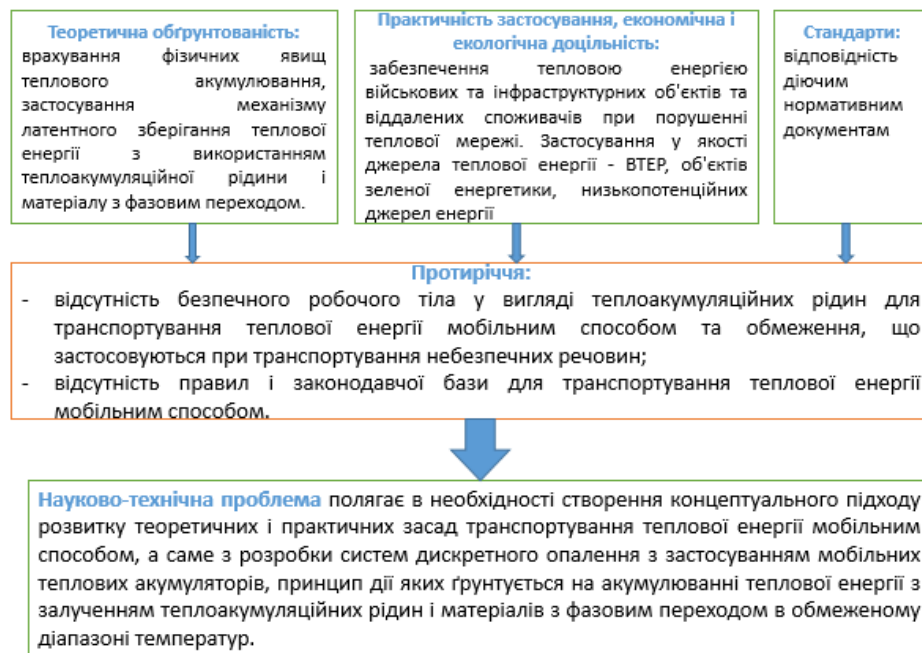


Рис. 1. Формулювання науково-технічної проблеми.

Другий розділ присвячено методам математичного моделювання, що було застосовано при вирішенні задач тепломасообмінних та гідродинамічних процесів при тепловому акумулюванні.

При вирішенні задач стаціонарного і нестаціонарного комплексного теплообміну при плівковому кипінні застосовували метод симетрії, при відсутності механічної взаємодії на межі пара-рідина (модель Бромлі) та рідина в стані спокою поза паровою плівкою (модель Елліона).

Метод ґрат Больцмана (Lattice Boltzmann methods, LBM) застосовували при моделюванні осцилюючого потоку в пористому середовищі в пласкому і циліндричному каналах для валідації з даними отриманими аналітичними розрахунками.

Метод молекулярної динаміки (Molecular dynamics method, MD) і метод дисипативних частинок (Dissipative particle method, DPD) було застосовано для створення дворівневої моделі при моделювання взаємодії між частинками теплоакумуляційної рідини. Метод молекулярної динаміки враховує сили взаємодії між частинками, а метод дисипативної динаміки частинок вирішує проблему у співвідношеннях між розмірами частинок.

У *третьому розділі* представлено результати моделювання тепломасообмінних та гідродинамічних процесів мобільного теплового акумулювання.

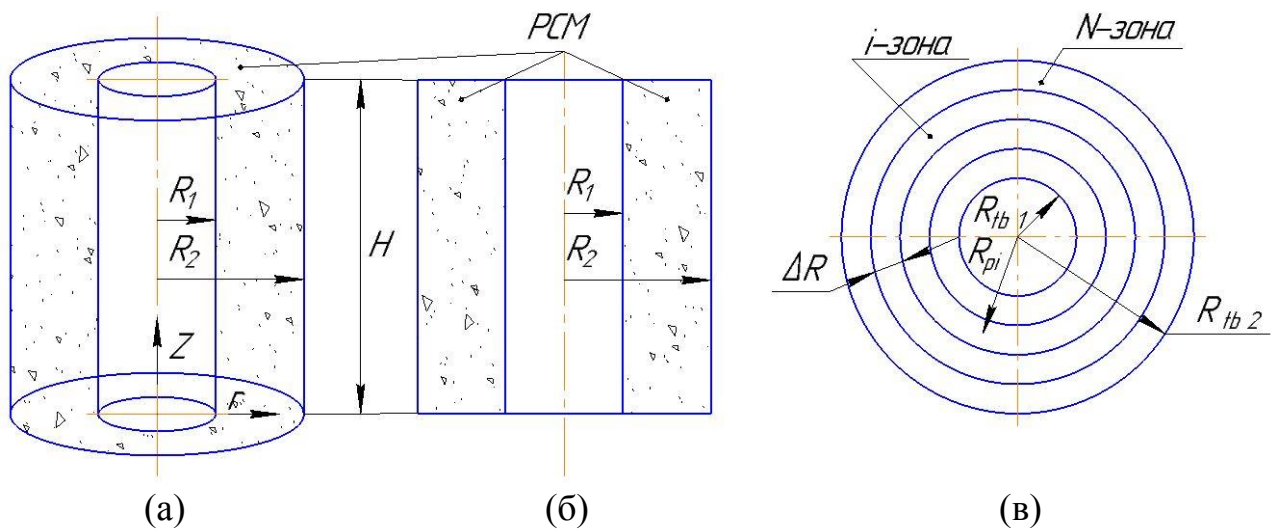
1. Моделювання процесів теплообміну в «тепловому ядрі» заповненого теплоакумулюючим матеріалом з фазовим переходом (PCM).

«Теплове ядро» має вигляд двох вертикальних співвісних металевих циліндрів типу «труба в трубі», рис. 2. Об'єм між внутрішнім і зовнішнім циліндрами заповнюється гарячим розплавом PCM до висоти $H_p < H$. Після охолодження розплавлений матеріал з фазовим переходом переходить в стан суцільної твердої речовини з температурою T_{p0} , яка дорівнює температурі холодної води, що знаходиться в об'ємі акумуляційної ємності. В початковий момент часу ($\tau=0$) вода у акумуляційній ємності починає поступово нагріватися за допомогою гарячого теплоносія, що проходить через змійовик, кільцеві витки якого розміщені поблизу від бокової поверхні ємності. Внаслідок нагрівання води в об'ємі ємності відбувається нагрівання і плавлення твердого PCM всередині «теплого ядра». Кількість енергії, затраченої на розплавлення твердої фази – це прихована теплота фазового переходу процесу плавлення.

Необхідно визначити, як змінюється з часом температура в будь-якій локальній точці в об'ємі PCM всередині «теплого ядра», а також розрахувати швидкість зміни ентальпії і, відповідно, середньо-об'ємної температури PCM в процесі нагрівання до заданої температури.

Моделні передумови, необхідні для розв'язання задачі: в процесах нагрівання-охолодження кількість PCM всередині кільцевої труби залишається незмінним, тобто густина вважається постійною ($\rho = \text{const}$); початкова стадія процесів нагрівання або охолодження PCM всередині «теплого ядра» визначається кінетикою теплообміну пристінкового шару PCM з оточуючою водою через поверхню стінки в трубі.

Вважається, що труба має досить велику довжину ($H \gg R_2$), тому межовими ефектами на кінцях труби можна знехтувати. В процесі нагрівання або охолодження PCM конвективне перенесення тепла в осьовому і в радіальному напрямку відсутнє. Перенесення тепла в об'ємі PCM всередині труби здійснюється тільки в радіальному напрямку внаслідок теплопровідності.



а – аксонометричне зображення; б – подовжній переріз; в – поперечний переріз
Рис. 2. Розрахункова схема «теплого ядра».

Поперечний переріз труби, в якій міститься PCM, вздовж усієї довжини має форму круглого кільця з внутрішнім радіусом R_{tb1} і зовнішнім радіусом R_{tb2} . Ширина

стілки труби $\Delta R_{tb} = R_{tb2} - R_{tb1}$. Радіус останньої зони ($i=N$), що прилягає до зовнішньої поверхні труби, визначається як $R_{pN} = R_{tb1} + N \cdot \Delta R$.

1. Виведення рівняння нагрівання РСМ всередині «теплого ядра»

Рівняння нестационарного переносу тепла шляхом теплопровідності в радіальному напрямку в циліндричних координатах

$$\rho c_p \frac{\partial T_p}{\partial \tau} = \frac{\lambda_p}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_p}{\partial r} \right) \quad (1)$$

де ρ – густина РСМ, кг/м³; c_p – теплоємність РСМ, Дж/кг·К; λ_p – теплопровідність РСМ, Вт/(м·К), τ – час, с; r – координата розташована перпендикулярно до поверхні бокової стінки циліндра.

Температуру на зовнішній поверхні i -ї зони ($1 \leq i \leq N$), яка визначає температуру в об'ємі i -ї зони, позначимо T_{pi} . Температура зовнішньої поверхні кожної i -ї зони дорівнює температурі внутрішньої поверхні наступної ($i+1$) зони.

Температура зовнішньої поверхні першої зони ($i=1$) визначається як T_{p1} . Температура внутрішньої поверхні першої зони тотожно дорівнює температурі внутрішньої поверхні $T_{p,i-1} \equiv T_{tb1}$. Температура в останній зоні ($i=N$) дорівнює температурі зовнішньої поверхні ($T_{p,N} = T_{tb2}$).

Кількість тепла, яке надходить в i -у зону в одиницю часу через внутрішню бічну поверхню висотою ΔZ з боку сусідньої ($i-1$) зони

$$Q_{pri}^+ = 2\pi \Delta Z \cdot \lambda_p \frac{(T_{p(i-1)} - T_{pi})}{\Delta R} R_{p,i-1}. \quad (2)$$

а кількість тепла, яке за одиницю часу залишає i -у зону через її зовнішню бічну поверхню висотою Δz і переходить в ($i+1$) зону, визначено за виразом

$$Q_{pri}^- = 2\pi \Delta Z \cdot \lambda_p \frac{(T_{pi} - T_{p(i+1)})}{\Delta R} R_{p,i}. \quad (3)$$

Зміна величини радіального теплового потоку в i -й зоні визначається різницею між кількістю тепла, що надходить в i -у зону, і кількістю тепла, що залишає цю зону

$$\Delta Q_{pri} = q_{pri}^+ - q_{pri}^- = \frac{2\pi \Delta Z \cdot \lambda_p}{\Delta R} [(T_{p(i-1)} - T_{pi}) R_{p(i-1)} - (T_{pi} - T_{p(i+1)}) R_{pi}]. \quad (4)$$

Рівняння переносу теплоти в елементарній i -й зоні

$$\frac{d(\Delta m_{pi} \cdot c_p \cdot T_{pi})}{d\tau} = \pi \Delta R [2R_{tb1} + (2i - 1)\Delta R] \cdot \Delta Z \cdot \rho_p \cdot c_p(T_p) \cdot \frac{dT_p}{d\tau}. \quad (5)$$

Радіальне перенесення теплоти в будь-якій i -й зоні окрім першої та останньої має вигляд

$$\frac{dT_{pi}}{d\tau} = \frac{2\lambda_p [(T_{p(i-1)} - T_{pi}) \cdot (R_{tb1} + (i-1) \cdot \Delta R) - (T_{pi} - T_{p(i+1)}) \cdot (R_{tb1} + i\Delta R)]}{(2R_{tb1} + (2i-1) \cdot \Delta R) \cdot \rho_p \cdot c_{pi}(T_{pi}) \cdot (\Delta R)^2}. \quad (6)$$

Радіальне перенесення тепла в першій елементарній зоні ($i=1$).

Температура внутрішньої поверхні першої елементарної зони T_{p1} дорівнює температурі внутрішньої стінки труби з РСМ T_{tb1} . Усереднена температура РСМ, що знаходиться у внутрішній трубці, визначається як $T_{wl} = f(\tau)$. Якщо у воді у внутрішній трубці теплової вставки має місце природна або вимушена конвекція, рівняння для першої зони набуває вигляду

$$\frac{dT_{p1}}{d\tau} = \frac{2 \cdot [k_1 \cdot (T_{w1} - T_{p1}) \cdot R_{tb1} \cdot \Delta R - \lambda_p (T_{p1} - T_{p2}) \cdot (R_{tb1} + \Delta R)]}{(2R_{tb1} + \Delta R) \cdot \rho_p \cdot c_{p1}(T_{p1}) \cdot (\Delta R)^2}, \quad (7)$$

де коефіцієнт теплопередачі k_1 через стінку труби до РСМ, визначається

$$k_1 = \frac{1}{1/\alpha_1 + \delta_m/\lambda_m + \Delta R/\lambda_p}, \quad (8)$$

де α_1 – коефіцієнт тепловіддачі від внутрішньої поверхні труби до РСМ, при вимушеній або природній конвекції, Вт/м² К; λ_m – коефіцієнт теплопровідності матеріалу труби (сталі), Вт/(м·К).

Очевидно, що рівняння (7) описує перенесення теплової енергії в першій зоні як при наявності конвекції, так і при її відсутності. В останньому випадку досить прийняти, що в знаменнику правої частини (8) член $1/\alpha_1=0$, і тоді $k_1=\lambda_p/\Delta R$.

Радіальне перенесення тепла в останній елементарній зоні ($i=N$).

Остання елементарна кільцева зона труби з водою ($i=N$) обмежена зовнішньою поверхнею труби з температурою T_{tb2} . Рівняння радіального перенесення тепла в останній зоні, має вигляд

$$\frac{dT_{pN}}{d\tau} = \frac{2 \cdot [\lambda_p \cdot (T_{p(N-1)} - T_{pN})(R_{tb1} + (N-1)\Delta R) - k_2(T_{pN} - T_{w2}) \cdot \Delta R \cdot (R_{tb1} + N\Delta R)]}{(2R_{tb1} + (2N-1) \cdot \Delta R) \cdot \rho_p \cdot c_{pN}(T_{pN}) \cdot (\Delta R)^2}, \quad (9)$$

де коефіцієнт теплопередачі k_2 через стінку труби до води визначається

$$k_2 = \frac{1}{1/\alpha_2 + \delta_m/\lambda_m}, \quad (10)$$

де α_2 – коефіцієнт тепловіддачі від внутрішньої поверхні труби до води всередині «теплового ядра».

Рівняння (9) описує процес перенесення теплоти в останній зоні як при наявності конвекції, так і при її відсутності. В останньому випадку достатньо прийняти, що в знаменнику правої частини (10) член $1/\alpha_2=0$, і тоді $k_2=\lambda_m/\delta_m$. Середня температура об'єму води поблизу зовнішньої стінки «теплового ядра» ємності теплового акумулятора визначається як $T_{w2}=f(\tau)$.

2. Аналітичні залежності теплоємності РСМ від температури

В якості РСМ для застосування в МТА вибрано церезин – суміш парафіну, церезину та олії (масова частка олії – 8,3%). Розглянуто процес нагрівання твердого церезину масою 1 кг від температури 20°C до 100°C. Розділимо цей температурний інтервал на сім ділянок, які відрізняються характером зміни від температури величини ентальпії, або ефективного коефіцієнта теплоємності.

Підвищення теплоємності на ділянці ΔT_{12} апроксимуємо косинусоїдальною залежністю виду

$$C_{p12}(T) = C_{ps0} + \frac{C_{max1} - C_{ps0}}{2} \cdot \left[1 - \cos\left(\frac{\pi(T - T_1)}{\Delta T_{12}}\right) \right] \text{ для } T_1 \leq T \leq T_2. \quad (11)$$

Аналогічно визначаємо теплоємність для кожної зони. Отримана аналітично залежність питомої теплоємності зразка церезину від температури представлена на рис. 31. Отримані розрахункові дані мають високу ступінь співпадіння з результатами експериментальних досліджень.

В інтервалі температур від 20°C до $27,5^{\circ}\text{C}$ на ділянці ΔT_{s01} , де теплоємність твердого церезину $c_{s0} = \text{const}$, ентальпія церезину зростає на величину ΔH_{12} , яка визначається за формулою

$$\Delta H_{s0-1} = \int_{T_{s0}}^{T_1} c_0 dT = c_0 \int_{T_{s0}}^{T_1} dT = c_{ps0} (T_1 - T_{s0}). \quad (12)$$

На ділянці $\Delta T_{12} = T_1 - T_2$ підвищення ентальпії визначається як

$$\Delta H_{1-2} = \int_{T_1}^{T_2} c_{p12} dT = \frac{c_{ps0} + c_{max1}}{2} \Delta T_{12}. \quad (13)$$

Аналогічно визначаємо ентальпію на кожній ділянці. На рис. 3 наведено залежність зміни ентальпії церезину від температури, розраховану за формулами (12)-(13).

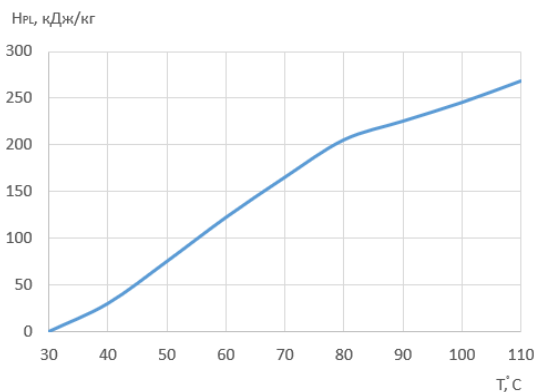


Рис. 3 Розрахунок зростання ентальпії зразка церезину при нагріванні від 30° до 110°C .

Для апробації моделі було проведено тестовий розрахунковий експеримент з кінетики нагрівання зразка церезину, що досліджувався, в «тепловому ядрі» при заданих температурних параметрах.

Експеримент проводився за наступними припущеннями. В початковий момент $\tau=0$ вода в ємності теплового акумулятора і церезин в «тепловому ядрі» знаходяться при однаковій температурі $T_0=30^{\circ}\text{C}$. Починаючи з цього моменту температура води поступово монотонно підвищується за рахунок підведення тепла до води через теплообмінник-змійовик (рис. 32)

через який проходить теплоносій з температурою $T_{max}=110^{\circ}\text{C}$. Передбачається, що зміна температури води в часі описується рівнянням

$$T_w = T_{max} - (T_{max} - T_0) \cdot e^{-\beta t}, \quad (14)$$

де β – емпіричний коефіцієнт, який визначає швидкість нагрівання води в ємності теплового акумулятора.

В даному розрахунковому експерименті ставилися задача визначення зміни значення температури в локальній зоні об'єму РСМ на довільній відстані від центру r в залежності від часу нагрівання τ . Таким чином, значення температури визначалося як функція двох змінних $T_{pt} = [f(r, \tau)]$. В даній тестовій задачі приймалося, що природна та вимушена конвекція на межі зі зовнішньою і внутрішньою поверхнями теплової вставки відсутня, а температура РСМ на межі внутрішньої і зовнішньої поверхонь «теплового ядра» в будь-який момент часу має однакове значення ($T_{w1} = T_{w2}$).

Результати даного розрахункового експерименту наведено на рис. 4, криві 1-6 ілюструють розподіл температури по радіусу кільцевої труби через кожну годину з моменту початку нагрівання. З рисунку видно, що за 6 годин нагрівання середня температура води в ємності нагрілася до 90°C , а температура церезину в центрі кільцевої труби майже на 20°C холодніша. За допомогою моделі можна дослідити кінетику охолодження або нагрівання даного РСМ з урахуванням впливу природної конвекції, а також кінетику процесу при наявності вимушеної конвекції всередині «теплового ядра».

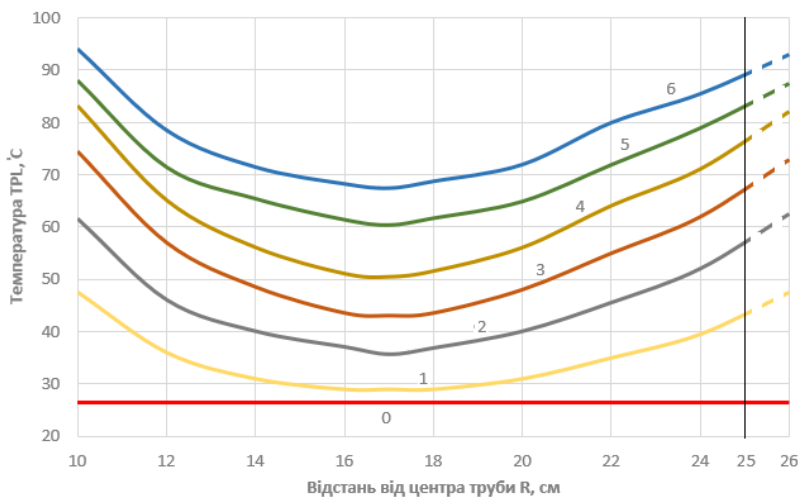


Рис. 4. Розподіл температури по ширині «теплого ядра» в процесі нагрівання в різні моменти часу: 0 – до нагрівання; 1 – через 1 год; 2 – через 2 год; 3 – через 3 год; 4 – через 4 год; 5 – через 5 год; 6 – через 6 год.

Зростання температури всередині «теплого ядра» відбувається внаслідок монотонного нагрівання ємності акумулятора з водою або теплоакumuлюючою рідиною від 27°C до 110°C. Значення температури при $R=10$ см відповідає температурі води на межі з внутрішньою поверхнею труби, а значення температури при $R=26$ см – температурі води на границі зі зовнішньою поверхнею кільцевої труби.

2. Радіаційно-конвективний теплообмін при плівковому кипінні рідини на вертикальній нагрітій поверхні в стаціонарному та нестаціонарному режимах.

При моделюванні процесів тепломасообміну і гідродинаміки у теплових акумуляторах розвинуто теорію радіаційно-конвективного теплообміну при плівковому кипінні рідини на вертикальній нагрітій поверхні в стаціонарному та нестаціонарному режимах, схема до моделювання представлена на рис. 5.

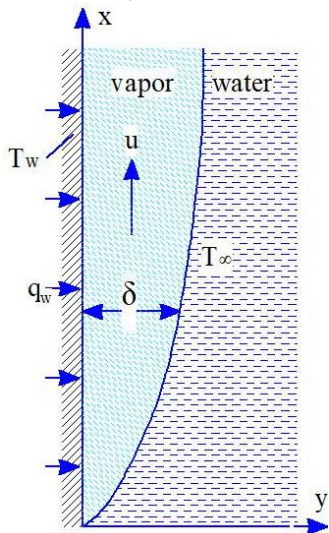


Рис. 5. Схема кипіння плівки на вертикальній стінці.

Модельні передумови, необхідні для розв'язання задачі: сили в'язкості та сили тяжіння в паровій плівці на порядок більші за сили інерції, тому останніми можна знехтувати; тепломасообмін у паровій плівці в ортогональному до стінки напрямку (тобто вздовж координати y) на порядок перевищує тепломасообмін у напрямку x , тому останнім можна знехтувати; на межі розділу між паровою плівкою та рідкою фазою ефект тертя та поверхневого натягу незначний; щільність рідини більш ніж на порядок перевищує щільність пари; теплообмінний пристрій має форму «змівика», при моделюванні прийнято, що це вертикальна труба.

При розв'язуванні рівнянь будуть розглядатися два типи граничних умов. Перший тип передбачає відсутність механічної взаємодії між паром і рухомою рідиною, тобто нульові напруги зсуву на межі розділу двох фаз (рідина рухається зі швидкістю, що дорівнює місцевій швидкості пари). Ці умови вперше були запропоновані Бромлі. Другий тип граничних умов, запропонований Елліоном, передбачає, що рідина за межами парової плівки (тобто безпосередньо на її зовнішній межі) перебуває в спокої. Вирішення стаціонарної і нестаціонарної задач проводили на основі рівняння

$$c_p \rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{dq_r}{dy} \quad (15)$$

де τ – час, с; q – тепловий потік, Вт/м²; y – координата; λ_m – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К); T – температура, К.

Проблема стаціонарного стану.

Для першого типу граничної умови Бромлі (відсутність механічної взаємодії між паром та рухомою рідиною на межі розділу між ними) застосовано такі граничні умови

$$\begin{aligned} u = 0, & \quad T = T_w, & \quad \text{при} & \quad y = 0 \\ \left(\frac{du}{dy} \right)_{y=\delta} = 0, & \quad T = T_\infty, & \quad \text{при} & \quad y = \delta \end{aligned} \quad (16)$$

де u – поздовжня швидкість, м/с; δ_m – товщина парової плівки, мм.

Для першого типу граничних умов додатково досліджено випадок, коли замість умов постійної температури на поверхню нагрівання задається постійний тепловий потік

$$\begin{aligned} u = 0, & \quad \left(\frac{dT}{dy} \right)_{y=0} = -\frac{q_w}{\lambda_{eff}}, & \quad \text{при} & \quad y = 0 \\ \left(\frac{du}{dy} \right)_{y=\delta} = 0, & \quad T = T_\infty & \quad \text{при} & \quad y = \delta \end{aligned} \quad (17)$$

де $\lambda_{eff} = \lambda + \lambda_r$ – ефективна теплопровідність, Вт/(м·К).

Другий тип граничних умов, сформульованих Елліоном, передбачає, що рідина знаходиться в стані спокою поза паровою плівкою і на межі між обома фазами. Застосовуємо граничні умови для температури і швидкості в шарі пари

$$\begin{aligned} u = 0, & \quad T = T_w & \quad \text{при} & \quad y = 0 \\ u = 0, & \quad T = T_\infty & \quad \text{при} & \quad y = \delta \end{aligned} \quad (18)$$

Що стосується першого типу граничних умов, то проводимо моделювання випадків постійної температури стінки та постійного теплового потоку на стінці

$$\begin{aligned} u = 0, & \quad \left(\frac{dT}{dy} \right)_{y=0} = -\frac{q_w}{\lambda_{eff}}, & \quad \text{при} & \quad y = 0 \\ u = 0, & \quad T = T_\infty & \quad \text{при} & \quad y = \delta \end{aligned} \quad (19)$$

При застосуванні моделі Бромлі, тобто відсутня механічна взаємодія на межі пара-рідина за умови $T_w = \text{const}$, розподіл температур має вигляд

$$\eta = \frac{3(1 - \vartheta) + 4Sr_1(1 - \vartheta^4)}{3(1 - \vartheta_\infty) + 4Sr_1(1 - \vartheta_\infty^4)}, \quad (20)$$

де η – самоподібна змінна; Sr – число Старка; ϑ – безрозмірна температура.

Рішення представлено на рис. 6. Очевидно, випромінювання не значно впливає на форму температурного профілю. Збільшення числа Старка після значення 0,3 практично дуже мало впливає на подальше перетворення температурного профілю.

Рівняння η дозволяє проаналізувати два граничні випадки. Перший – конвекція набагато слабша за випромінювання ($Sr_1 \rightarrow \infty$)

$$\vartheta = \sqrt[4]{1 - \eta(1 - \vartheta_\infty^4)} \quad (21)$$

В іншому граничному випадку конвекція переважає над випромінюванням ($Sr_1 \rightarrow 0$)

$$\vartheta = 1 - \eta(1 - \vartheta_\infty) \quad (22)$$

Рис. 7 демонструє вплив параметра ϑ_∞ на профілі граничної температури. Профілі 1-3 розраховуються відповідно до рівняння (21) і профілі 4-6 розраховуються за рівнянням (22).

Різниця між граничними профілями ϑ_∞ зростає зі зменшенням значення параметра, тобто збільшенням різниці температур стінки та температури насичення. При великих перепадах температур переважає теплове випромінювання.

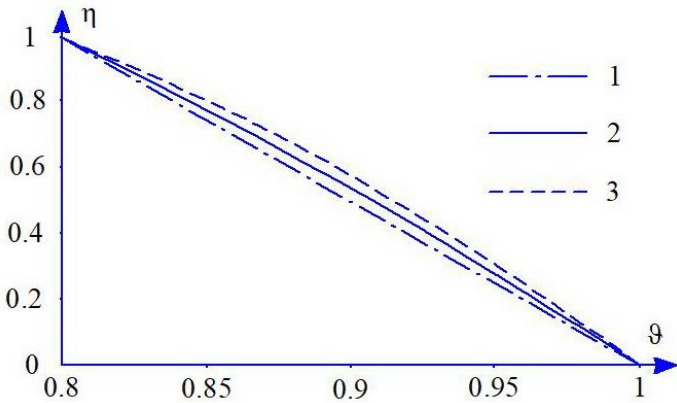


Рис.6. Профілі температури при $\vartheta_\infty = 0,8$: 1- $Sr_1=0$; 2- $Sr_1=0,3$; 3- $Sr_1=1000$.

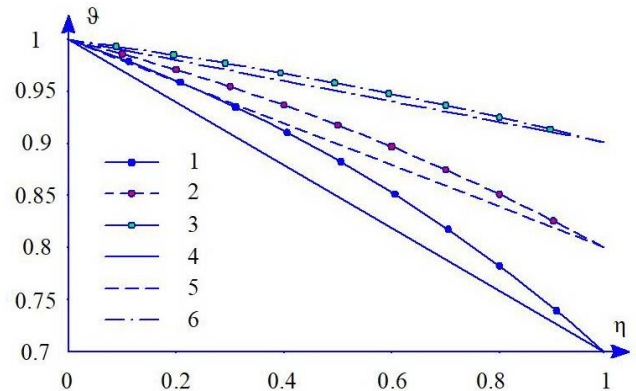


Рис. 7. Профілі граничних температур: 1,4 - $\vartheta_\infty=0,7$; 2,5- $\vartheta_\infty=0,8$; 3,6- $\vartheta_\infty=0,9$.

Знайдено співвідношення для коефіцієнта теплопередачі

$$\alpha = \frac{q_w}{T_w - T_\infty} = \frac{\lambda}{\delta} \left(1 + \frac{B}{4\lambda} \frac{(T_w^4 - T_\infty^4)}{(T_w - T_\infty)} \right) = \frac{\lambda}{\delta} \left(1 + \frac{4}{3} Sr_2 \right) = \frac{\lambda}{\delta_0} \left(1 + \frac{4}{3} Sr_2 \right)^{3/4}, \quad (23)$$

і для числа Нуссельта

$$Nu = \frac{\alpha x}{\lambda} = Nu_0 \left(1 + \frac{4}{3} Sr_2 \right)^{3/4}, \quad (24)$$

де $Nu_0 = \frac{\alpha_0 x}{\lambda} = \sqrt[4]{\frac{1}{4} RaJa}$ – число Нуссельта для плівкового кипіння без ви-

промінювання.

Число Релея Ra визначається як

$$Ra = \frac{gx^3 \rho \Delta \rho_p}{\lambda \mu}, \quad (25)$$

Число Якоба визначається як

$$Ja = \frac{L_v}{c_p \Delta T}, \quad (26)$$

де c_p – теплоємність при постійному тиску, Дж/кг·К.

Отже, на відміну від випадку чистої конвекції, при конвективно-радіаційному теплообміні зі збільшенням числа Старка одночасно зростає як товщина шару пари, так і інтенсивність теплообміну.

Згідно з умовою сталості густини теплового потоку на стінці, яка описується граничними умовами (17).

Умова $q_w = \text{const}$. За граничних умов
 $\delta = 0$ при $x = 0$ (27)

вираз для визначення товщини плівки має вигляд

$$\delta = \sqrt[3]{\frac{3q_w \mu x}{gL_v \rho \Delta \rho}} \quad (28)$$

L_v – питома теплота фазового переходу, Дж/кг.

Числа Нуссельта у формі рівняння (24), де

$$\text{Nu}_0 = \frac{\alpha_0 x}{\lambda} = \sqrt[4]{\frac{1}{3} \text{RaJa}} \quad (29)$$

Отже, ефект радіаційного теплообміну під час плівкового кипіння в рамках моделі Бромлі є однаковим для двох типів теплових граничних умов $T_w = \text{const}$ і $q_w = \text{const}$. Відмінності можна спостерігати лише в інтенсивності конвективного теплообміну.

Розглядаємо другий набір граничних умов, запропонований Елліоном, що описує стан спокою рідини на зовнішній межі парової плівки (і поза нею). Рівняння для числа Нуссельта має вигляд виразу (24)

де, $\text{Nu}_0 = \sqrt[4]{\frac{1}{12} \text{RaJa}}$ - це число Нуссельта для плівкового кипіння без випромінювання.

Умова $q_w = \text{const}$. Для цього випадку з урахуванням відповідних граничних умов, що задаються у вигляді рівнянь (19). Рівняння для числа Нуссельта, де число Нуссельта для плівкового кипіння без випромінювання визначається рівнянням

$$\text{Nu}_0 = \sqrt[4]{\frac{1}{12} \text{RaJa}} \quad (30)$$

Отже, для випадку спокою рідини поза паровою плівкою число Нуссельта залишається незмінним для граничних умов $T_w = \text{const}$ і $q_w = \text{const}$.

Проблема нестационарності. Якщо припустити, що парова плівка на нагрітій стінці виникає миттєво (миттєве кипіння), а температура змінюється з часом, то можливо оцінити вплив радіаційного теплообміну на зміну температурного профілю та коефіцієнта тепловіддачі.

Нестационарна задача вирішувалась на основі методу симетрії (тобто аналізу групи Лі), за допомогою нескінченно інфінітезимального генератора

$$\mathbf{V} = (C_1 + C_3 2t) \frac{\partial}{\partial t} + (C_2 + C_3 y) \frac{\partial}{\partial y} \quad (31)$$

C_1, C_2, C_3 – перша, друга, третя підалгебра, відповідно.

Що дозволило звести рівняння в часткових похідних до вигляду

$$\left(1 + \frac{16}{3} Sr_1 \vartheta^3\right) \frac{d^2 \vartheta}{d\zeta^2} + \left(\frac{\zeta}{2} + 16 Sr_1 \vartheta^2 \frac{d\vartheta}{d\zeta}\right) \frac{d\vartheta}{d\zeta} = 0, \quad (32)$$

де ζ - самоподібна змінна.

Умова $T_w = \text{const}$. Розв'язок рівняння (32) проводимо за граничних умов

$$\vartheta = 1, \quad \text{при} \quad \zeta = 0, \quad (33)$$

$$\vartheta = \vartheta_{\infty}, \quad \text{при} \quad \zeta = \zeta_{\delta} = \frac{1}{\sqrt{Fo}},$$

де

$$Fo = \frac{\lambda \tau}{c_p \rho \delta^2} \quad (34)$$

Рішення рівняння (32) з граничними умовами (33) отримано чисельно за допомогою програми MATLAB. Результати чисельного моделювання наведені на рис. 8 для різних значень числа Фур'є.

При малих значеннях безрозмірного часу (тобто числа Фур'є) профіль температури в паровій плівці має найбільше відхилення. Зі збільшенням числа Фур'є профіль температури прагне до стаціонарного розподілу.

Рис. 9 ілюструє зміну в часі нормалізованого числа Нуссельта Nu/Nu_{st} в залежності від інтенсивності радіаційного теплообміну (число Старка). В цьому випадку Nu_{st} відповідає стаціонарним умовам і визначається рівнянням (24).

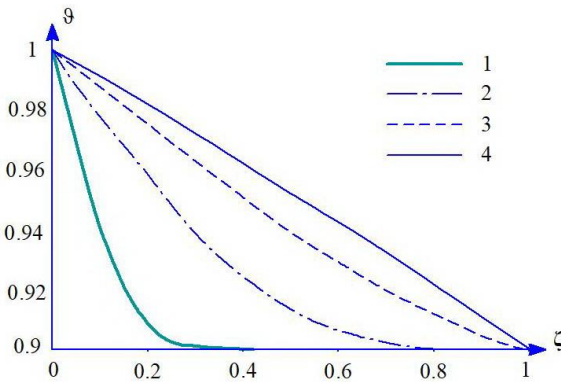


Рис. 8. Зміна в часі профілю температури в паровій плівці при $\vartheta_{\infty}=0.9$, $Sr_1=1$: 1- $Fo=0.001$; 2- $Fo=0.01$; 3- $Fo=0.04$; 4- $Fo=1$.

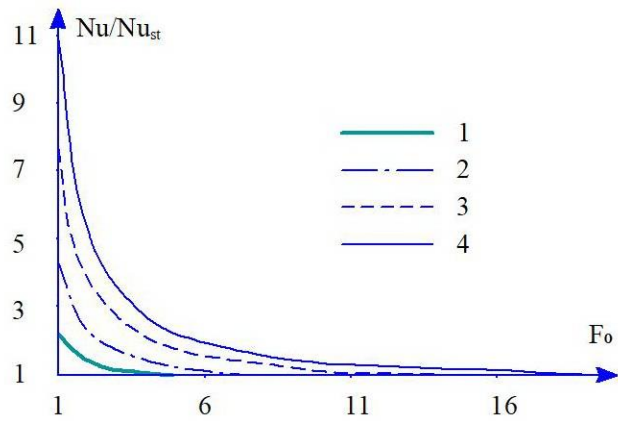


Рис. 9. Зміна в часі нормалізованого числа Нуссельта Nu/Nu_{st} залежно від числа Старка при $\vartheta_{\infty}=0,9$; 1- $Sr_1=0$; 2- $Sr_1=1$; 3- $Sr_1=4$; 4- $Sr_1=8$.

Зі збільшенням часу нагрівання число Нуссельта прагне від нескінченності до сталого значення. Збільшення числа Старка призводить до збільшення тепловіддачі а отже, до збільшення числа Нуссельта. Рис. 9 також демонструє, що збільшення радіаційного теплового потоку призводить до зростання часу необхідного для досягнення числом Нуссельта стаціонарного значення близько 16.

Умова $q_w = \text{const}$. Подібний результат був отриманий в умовах постійного теплового потоку на стінку. У цьому випадку розв'язок рівняння (32) буде отримано за таких граничних умов

$$\frac{d\vartheta}{d\zeta} = -Nu_{\delta}(1-\vartheta_{\infty}) \frac{\sqrt{Fo}}{\left(1 + \frac{16}{3}Sr_1\right)}, \quad \text{при} \quad \zeta = 0 \quad (35)$$

$$\vartheta = \vartheta_{\infty}, \quad \text{при} \quad \zeta = \zeta_{\delta} = \frac{1}{\sqrt{Fo}}.$$

На рис. 10 зображено зміну в часі числа Нуссельта Nu/Nu_{st} в залежності від інтенсивності радіаційного теплообміну (число Старка). Залежна від часу зміна числа

Нуссельта подібна до проаналізованої вище на рис. 9. Отже, як і в стаціонарному режимі плівкового кипіння, вплив радіаційного теплообміну на число Нуссельта для двох типів граничних умов $T_w = \text{const}$ і $q_w = \text{const}$ аналогічні.

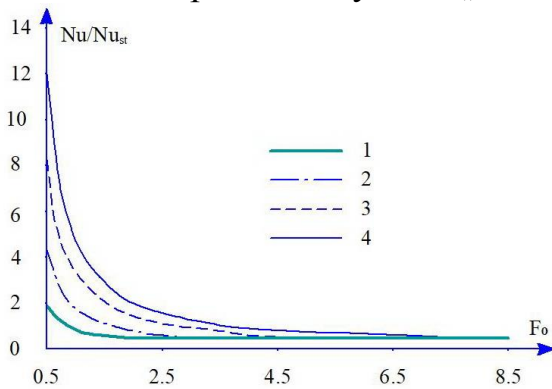


Рис. 10. Зміна в часі нормалізованого числа Нуссельта Nu/Nu_{st} залежно від числа Старка при $\vartheta_{\infty}=0,9$; 1- $Sr_1=0$; 2- $Sr_1=1$; 3- $Sr_1=4$; 4- $Sr_1=10$.

малих значеннях різниці між температурою стінки і температурою рідини випромінювання мало впливає на профілі температури в паровій плівці. Дія випромінювання значно посилюється зі збільшенням різниці температур між стінкою і рідиною.

В результаті вирішення нестационарної задачі отримано залежну від часу зміну профілю температури та коефіцієнта тепловіддачі в паровій плівці. Показано вплив випромінювання (число Старка) на коефіцієнт тепловіддачі. Збільшення радіаційного теплового потоку призводить до збільшення числа Нуссельта і часу, за який процес теплопередачі виходить на стаціонарний режим. Аналіз результатів демонструє, що тип граничних умов ($T_w=\text{const}$ та $q_w=\text{const}$) мало впливає на характер радіаційно-конвективного теплообміну при кипінні плівки рідини на вертикальній нагрітій стінці.

3. Моделювання осцилюючого потоку в пористому середовищі.

В ємнісних акумуляторах розглядалась можливість використання матеріалів при фазовому переході у вигляді капсул, однак така структура може викликати осциляції потоку рідини, що подається в «теплове ядро». Тому, було розроблено нестационарна модель осцилюючого потоку рідини в пористому середовищі у плоских та циліндричних каналах дозволяє оцінити вплив осциляцій на гідродинаміку потоку теплоносія води.

Осцилюючий потік у плоскому каналі. Для опису осцилюючого потоку рідини представленого на рис. 11, розгорнемо рівняння гідродинаміки осцилюючого потоку в пористому плоскому каналі

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} - \nu \frac{\phi}{K} u \quad (36)$$

τ – час, с; u – поздовжня швидкість, м/с; ϕ – пористість; ν – кінематична в'язкість, m^2/s ; x, y – поздовжня та поперечна координата; K – проникність пористого середовища; ρ – густина, kg/m^3 .

Граничними умовами є

$$u = -L \frac{\partial u}{\partial y} \quad \text{при } y = h \quad (37)$$

$$u = L \frac{\partial u}{\partial y} \quad \text{при } y = -h$$

де h - півширина каналу, L - довжина проковзування.

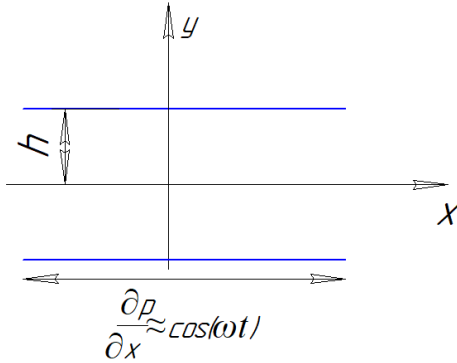


Рис. 11. Схема осцилюючого потоку рідини у плоскому каналі.

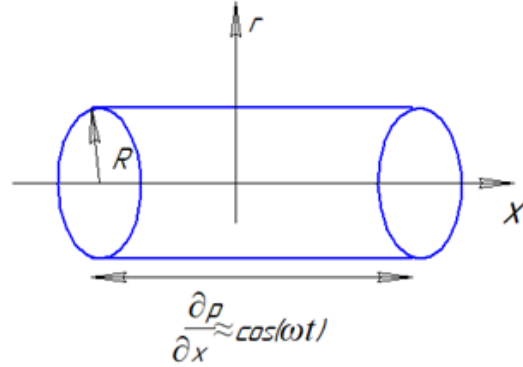


Рис. 12. Схема осцилюючого потоку рідини в циліндричному каналі.

Усереднена швидкість осцилюючого потоку у відносному вигляді

$$U(\bar{y}) = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} u(\tau, \bar{y})^2 d(\omega\tau)} = \sqrt{\frac{1}{2} \frac{nr(\bar{y})^2 + ni(\bar{y})^2}{dr^2 + di^2}} \quad (38)$$

У даному випадку усереднену швидкість (витрата) осцилюючого потоку

$$G = \sqrt{\int_{-1}^1 2U(\bar{y})^2 d\bar{y}} = \left[\frac{2ab - (a^2 + b^2 - 2(a-b)(a+b)Kn - (a^2 + b^2)Kn^2) \cos(2a) + 2ab(a^2 + b^2 + 2(a-b)(a+b)Kn + (a^2 + b^2)^2 Kn^2) \cosh(2b) + b(b^2 - a^2(3 + 4(a^2 + b^2)Kn)) \sin(2a) + a(a^2 - 3b^2 + 4b^2(a^2 + b^2)Kn) \sinh(2b)}{[2ab(a^2 + b^2)(dr^2 + di^2)]^1} \right] \quad (39)$$

Осцилюючий потік у циліндричному каналі. Для осцилюючого потоку в циліндричному каналі безрозмірне рівняння імпульсу має вигляд

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} \right) - \nu \frac{\phi}{K} u \quad (40)$$

де r - радіальна координата, рис. 12.

Задача вирішена за граничних умов

$$u = -L \frac{\partial u}{\partial r} \quad \text{при } r = R,$$

$$\frac{\partial u}{\partial r} = 0 \quad \text{при } r = 0, \quad (41)$$

де R - радіус каналу циліндричного перерізу, рис.12.

Проведено розрахунки усередненої швидкості потоку рідини у безрозмірному вигляді за рівнянням

$$U(r) = \sqrt{\frac{1}{2} \left(\Re(\bar{w}(\bar{r}))^2 + \Im(\bar{w}(\bar{r}))^2 \right)} \quad (42)$$

У випадку циліндричного каналу усереднена швидкість (витрата) осцилюючого потоку має вигляд

$$\bar{u} = \frac{ns \sin(\bar{\omega} \tau) + cs \cos(\bar{\omega} \tau)}{dnc} \quad (43)$$

де

$$\begin{aligned} \bar{n}\bar{s} = & \text{ber}_0(\sqrt{\text{Sh}})^2 + \text{bei}_0(\sqrt{\text{Sh}})^2 - \text{ber}_0(\sqrt{\text{Sh}})\text{ber}_0(\bar{r}\sqrt{\text{Sh}}) - \text{bei}_0(\sqrt{\text{Sh}})\text{bei}_0(\bar{r}\sqrt{\text{Sh}}) + \\ & \text{Kn}\sqrt{\text{Sh}/2} \left[\text{ber}_1(\sqrt{\text{Sh}}) \left[\text{ber}_0(\bar{r}\sqrt{\text{Sh}}) - \text{bei}_0(\bar{r}\sqrt{\text{Sh}}) \right] + \text{bei}_1(\sqrt{\text{Sh}}) \left[\text{ber}_0(\bar{r}\sqrt{\text{Sh}}) + \text{bei}_0(\bar{r}\sqrt{\text{Sh}}) \right] \right] - \\ & \text{Kn}^2 \text{Sh} \left(\text{ber}_1(\sqrt{\text{Sh}})^2 + \text{bei}_1(\sqrt{\text{Sh}})^2 \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{n}\bar{c} = & \text{bei}_0(\sqrt{\text{Sh}})\text{ber}_0(\bar{r}\sqrt{\text{Sh}}) - \text{ber}_0(\sqrt{\text{Sh}})\text{bei}_0(\bar{r}\sqrt{\text{Sh}}) + \\ & \text{Kn}\sqrt{\text{Sh}/2} \left[\text{ber}_1(\sqrt{\text{Sh}}) \left(\text{ber}_0(\bar{r}\sqrt{\text{Sh}}) + \text{bei}_0(\bar{r}\sqrt{\text{Sh}}) \right) - 2\text{ber}_0(\sqrt{\text{Sh}}) \right] + \\ & + \text{bei}_1(\sqrt{\text{Sh}}) \left(\text{bei}_0(\bar{r}\sqrt{\text{Sh}}) - \text{ber}_0(\bar{r}\sqrt{\text{Sh}}) \right) + 2\text{ber}_0(\sqrt{\text{Sh}}) - 2\text{bei}_0(\sqrt{\text{Sh}}) \left(\text{ber}_1(\sqrt{\text{Sh}}) + \text{bei}_1(\sqrt{\text{Sh}}) \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{d}\bar{n}\bar{c} = & \text{Sh} \left\{ \text{ber}_0(\sqrt{\text{Sh}})^2 + \text{bei}_0(\sqrt{\text{Sh}})^2 - \text{ber}_0(\sqrt{\text{Sh}})\text{ber}_0(\bar{r}\sqrt{\text{Sh}}) - \text{bei}_0(\sqrt{\text{Sh}})\text{bei}_0(\bar{r}\sqrt{\text{Sh}}) + \right. \\ & \text{Kn}\sqrt{2\text{Sh}} \left(\text{ber}_0(\sqrt{\text{Sh}}) \left[\text{ber}_1(\sqrt{\text{Sh}}) + \text{bei}_1(\sqrt{\text{Sh}}) \right] + \text{bei}_0(\sqrt{\text{Sh}}) \left[\text{ber}_1(\sqrt{\text{Sh}}) - \text{bei}_1(\sqrt{\text{Sh}}) \right] \right) + \\ & \left. \text{Kn}^2 \text{Sh} \left(\text{ber}_1(\sqrt{\text{Sh}})^2 + \text{bei}_1(\sqrt{\text{Sh}})^2 \right) \right\} \end{aligned}$$

Для верифікації отриманих аналітичних рішень було застосовано ґратковий метод Больцмана. При цьому час релаксації ζ при моделюванні мікропотоків визначається за допомогою числа Кнудсена, а не в'язкості

$$\varsigma = \text{Kn}N_y + \frac{1}{2} \quad (44)$$

де N_y - кількість елементів у стовпі решітки поперек каналу.

Швидкість ковзання по стінці розраховується як

$$u_w = u' \frac{\text{Kn} N_y}{(1 + \text{Kn} N_y)} \quad (45)$$

де u' – компоненти швидкості в ґратах, прилеглих до стінки.

Було задано наступні макроскопічні граничні умови: на вході – осцилюючий потенціал; нульовий градієнт швидкості на виході; бокові стінки з компонентами швидкості ковзання u_w .

Осцилюючі зміни потенціалу формувались програмним шляхом на вхідній межі. Розрахунки проводилися в середовищі GNU Octav, сумісному з середовищем MATLAB.

Поведінка потоку рідини при впливі осцилюючого градієнта потенціалу визначається трьома безрозмірними параметрами Sh, Da і Kn. Результати розрахунків профілів U/U_0 щодо різних числових значень параметра Sh представлені на рис. 13 та рис. 14 за умови сталості значень параметрів Da та Kn. Суцільні лінії позначають аналітичні профілі, побудовані відповідно до рівнянь (38) і (42); пунктирними лініями позначені чисельні результати LBM. На рисунках U_0 значення U в центрі каналу. З рис. 13 та рис. 14 очевидно, що характер впливу частоти осциляцій Sh на профілі

швидкості плоскому і круглому каналах однаковий. Зі збільшенням значення Sh максимум опосередкованого за період коливань потоку частинок зміщується від центру до периферії. У каналах при осцилюючому поздовжньому градієнті тиску середнє значення квадрата швидкості звичайної рідини або газу має максимальне значення біля стінки. Аналітичні дані порівнювалися з чисельними результатами, одержаними за допомогою LBM. З рис. 13 та 14 видно, що результати аналітичного та чисельного моделювання досить добре узгоджуються.

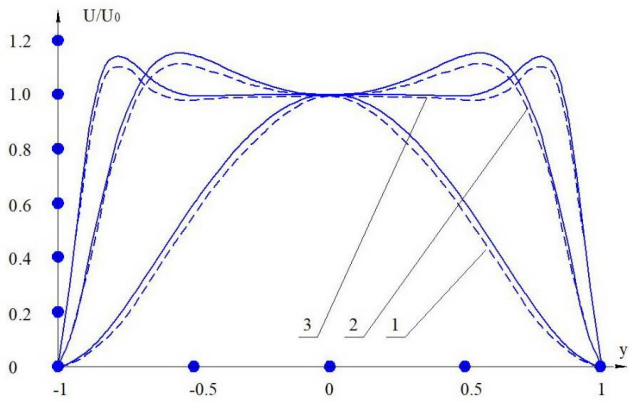


Рис. 13. Профілі відносного потоку U/U_0 в плоскому каналі для різних значень параметра Sh . Суцільні лінії - 1 і 2, пунктир - LBM.

1 – $Sh=5$; 2 – $Sh=50$; 3 – $Sh=200$.

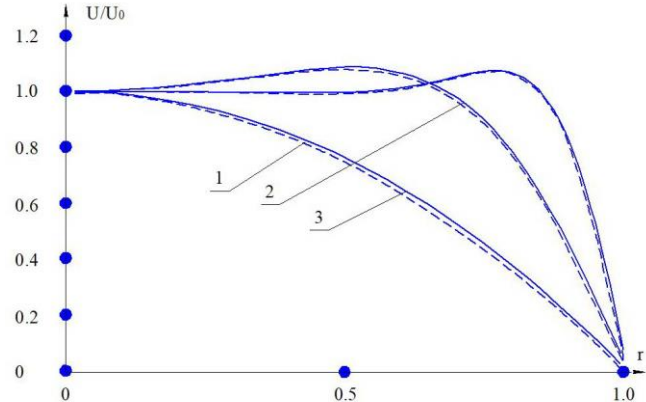


Рис. 14. Профілі відносного потоку U/U_0 в циліндричному каналі для різних значень параметра Sh . Суцільні лінії – 2 і 3, пунктир - LBM.

1 – $Sh=5$; 2 – $Sh=50$; 3 – $Sh=200$.

Вплив параметру Da на поведінку профілів швидкості в осцилюючому потоці показано на рис. 15 та рис. 16. Як видно, з рисунків чисельне значення параметру Da несуттєво впливає на положення максимуму швидкості. Якщо параметр Da збільшується, зменшується вплив зіткнень на профілі швидкості. Це, в свою чергу, зменшує опір. І тому, значення максимуму профілю швидкості зростає. Можна відзначити досить високе узгодження результатів аналітичного та чисельного моделювання.

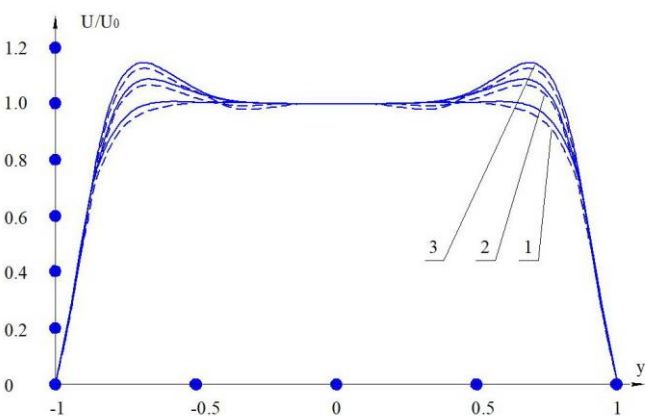


Рис. 15. Профілі відносного потоку U/U_0 в плоскому каналі для різних значень параметру Da . Суцільні лінії - 2 і 1, штрихові - LBM.

1 – $Da=0.01$; 2 – $Da=0.05$; 3 – $Da=1000$.

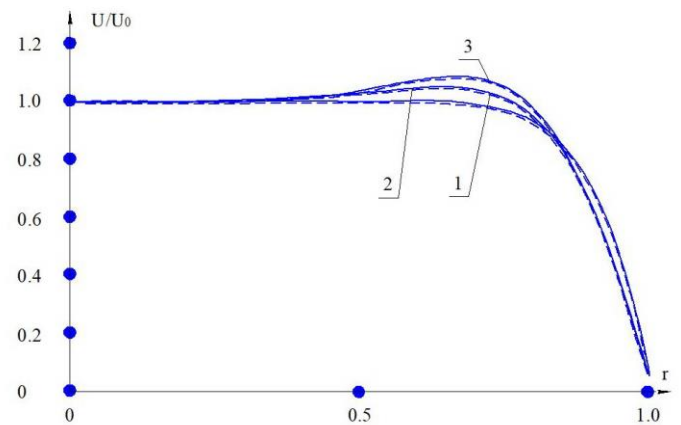


Рис. 16. Профілі відносного потоку U/U_0 в циліндричному каналі для різних значень параметру Da . Суцільні лінії - 2 і 3, штрихові лінії - LBM.

1 – $Da=0.01$; 2 – $Da=0.05$; 3 – $Da=1000$.

На рис. 17 та рис.18 зображено вплив значень параметрів Sh та Da на значення безрозмірної витрати (продуктивності), представлено лише данні LBM, оскільки ці данні практично співпадають з аналітичними. Показано, що збільшення частоти осциляцій призводить до зменшення витрати потоку a , відповідно і продуктивності обладнання. Це пояснюється зростанням інерційності осцилюючого потоку із зростанням частоти. Зменшення продуктивності обладнання за рахунок осциляції потоку негативно впливає на рух теплоносія і процес теплообміну в цілому. В осцилюючому режимі зміна напрямку потоку рідини відбувається шляхом утворення вихорів. Отже, зі зростанням частоти зростає хаотичність руху носіїв та кількість їх зіткнень. Таким чином, зростання частоти призводить до зростання опору потоку теплоносія.

На рис. 17 показано, що зростання параметра Da (зменшення впливу зіткнень носіїв) призводить до збільшення продуктивності (витрат). Зі зростанням частоти вплив параметра Da зменшується через утворення вихорів.

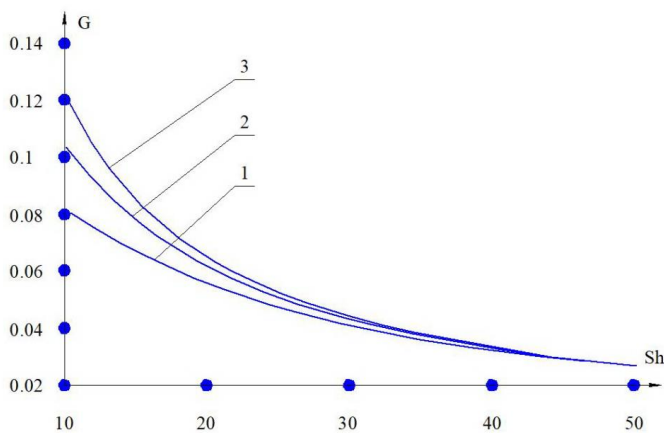


Рис. 17. Залежність безрозмірної витрати потоку рідини G у плоскому каналі для різних значень параметра Da .
1 - $Da = 0.1$; 2 - $Da = 0.2$; 3 - $Da = 1$.

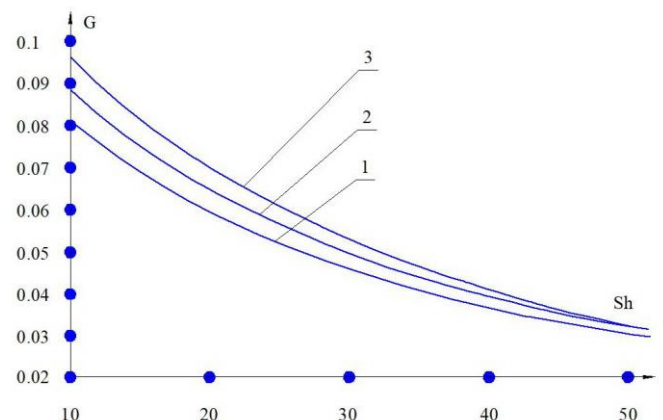


Рис. 18. Залежність безрозмірної витрати потоку рідини G у циліндричному каналі для різних значень параметра Da .
1 - $Da = 0.1$; 2 - $Da = 0.2$; 3 - $Da = 1$.

Зі збільшенням значення частоти (Sh) у плоскому та круглому каналах максимум опосередкованого за період коливань потоку частинок зміщується від центру до периферії. Отримані результати аналітичного та чисельного моделювання досить добре узгоджуються.

У *четвертому розділі* представлено результати комплексних експериментальних досліджень створення теплоакумуючої рідини. Проведено експериментальні дослідження основних теплофізичних властивостей, надано рекомендації щодо використання. А також, запропоновано технологію для приготування теплоакумуючої рідини у вигляді мобільного технологічного комплексу.

В результаті огляду літературних джерел для створення безпечної теплоакумуючої рідини було обрано водорозчинні полімери рослинного походження – карбоксиметилцелюлозу, ксантанову та гуарову камеді. Проведено комплекс попередніх експериментальних досліджень термоцикування і обрано поєднання, представлені у табл. 1. Дослідження проводили на експериментальному лабораторному стенді представленому на рис. 19.

Для проведення досліджень термоцикування, було створено лабораторний експериментальний стенд, який дозволяє дослідити процеси акумуляції методом Т-

history. Зазначений метод дозволяє працювати, як з мікрооб'єктами так і з макрооб'єктами до 100... 125 мл, різної консистенції – твердої чи рідкої.

Основними елементами є ємність 1 (поз. 6, рис.19) в якій міститься досліджуваний зразок теплоакумуючої рідини та ємність 2 (поз. 5) в якій розташовано досліджуваний РСМ. Тобто, в кожному експерименті досліджується два «робочих» тіла. В кожену ємність встановлено термоелектричний перетворювач температури хромель-алюмель, що з'єднаний з автоматичним цифровим перетворювачем TRITON який вимірює і реєструє покази зміни температури і виводить їх на екран комп'ютера.

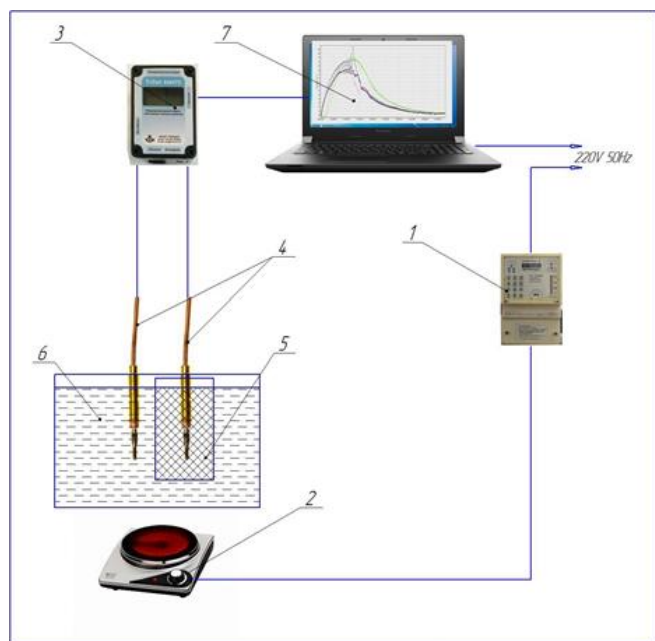


Рис. 19. Лабораторний стенд: 1 – лічильник електроенергії; 2 – нагрівальний елемент; 3 – АЦП TRITON 6004ТС; 4 – термоелектричний перетворювач температури; 5 – ємність з РСМ; 6 – ємність з шуканою теплоакумуючою рідиною; 7 – ПК.

Досліджувані зразки підібраних матеріалів розташовували у поєднаннях наведених у таблиці 1, розміщували у ємностях 1 і 2 підігрівали до температури 90°C і охолоджували. Під час проведення експерименту фіксували час нагріву і охолодження зразків, витрати електроенергії на нагрів. Для отримання даних про акумуляційну здатність проведено цикл з п'яти досліджень для кожного зразка за однакових умов проведення експерименту. Отримані дані представлені як середнє значення. Результати експериментальних досліджень представлено на рис. 20 - 22.

Таблиця 1. Порядок поєднання складових теплоакумуючої рідини при проведенні експериментальних досліджень

№ експерименту	Ємність 1	Ємність 2
Дослід №1	вода	речовина РСМ
Дослід №2	вода + антифриз	речовина РСМ
Дослід №3	вода + NaHCO ₃	речовина РСМ
Дослід №4	вода+ NaHCO ₃ +антифриз	речовина РСМ
Дослід №5	вода+ NaHCO ₃ +антифриз+кмц	речовина РСМ
Дослід №6	вода+гуарова камедь (10гр)	речовина РСМ
Дослід №7	вода+гуарова камедь (1гр)	речовина РСМ
Дослід №8	вода+антифриз+гуарова камедь(10гр)	речовина РСМ
Дослід №9	вода+ксантанова камедь (1гр)	речовина РСМ
Дослід №10	вода+антифриз+ксант камедь(1гр)	речовина РСМ

Дослідження акумуляційної здатності теплоакумулюючої рідини методом T-history в діапазоні температур від 30°C до 120°C.

Час експерименту включає час нагріву та час охолодження – це дорівнює одному циклу. З рисунку видно, що найкоротший час циклу у Досліді №1 де вода нагрівала РСМ. Це пояснюється високою питомою теплоємністю у порівнянні з будь якою іншою рідиною. У Досліді №2 воду замінили на теплоакумулюючу рідину, що складається з води і антифризу, це подовжило час циклу на 15%. Але найбільший час циклу у Досліді №7 він у порівнянні з Дослідом №1 більший на 24%, що свідчить про подовжений період акумуляції за рахунок додавання 1% гуарової камеді. Також, необхідно відзначити Досліди № 4, 8 і де час циклу подовжується на 14,7% та 13,8%, відповідно. Але при проведенні процесу термоцикування у Досліді №4 спостерігалось вспінювання, збільшення об'єму теплоакумулюючої рідини і різкий запах, що унеможливило використання соди як компонента. В Дослідах №9 і №10 час циклу збільшено на 9,5% та 11,4%, відповідно, рис. 20.

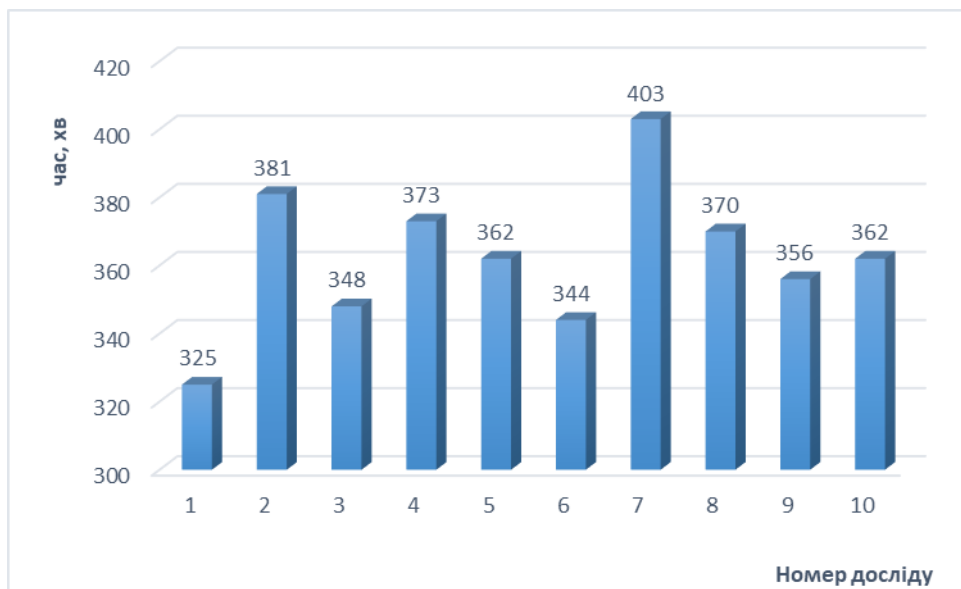


Рис. 20. Середня тривалість циклу «нагріву-охолодження» зразків.

Максимальне енергоспоживання на цикл зафіксовано у Досліді №1 де вода нагріває РСМ, найменше енергоспоживання на цикл у Досліді №10, де до складу теплоакумулюючої рідини входить антифриз і ксантанова камедь 1%. Різниця між даними дослідями становить 27,3%, що є суттєвою різницею для пересічного споживача і неприпустимою для промисловості.

В Дослідах №4, №5 і №9 енергоспоживання, що приходить на 1 цикл на 21,5% менше ніж приходить у Досліді №1, що підтверджує ефективність використання компоненти КМЦ, ксантанової камеді та Na_2CO_3 , рис. 21.

В Дослідах №7 і №8, де використовується гуарова камедь, результати тотожні Досліді №1.

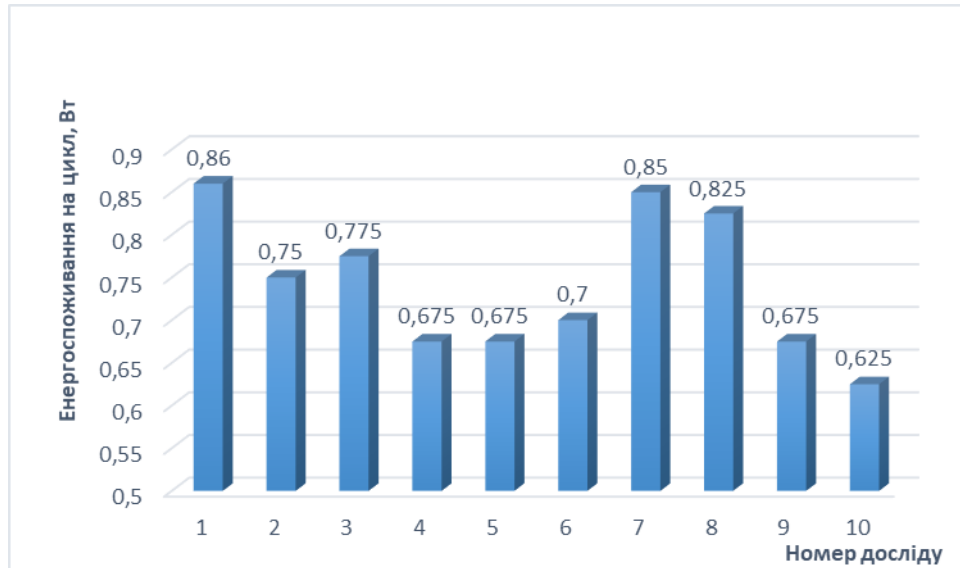


Рис. 21. Середнє споживання енергії кожного зразка за цикл.

Співвідношення витраченої енергії до часу проведення циклу «нагріву/охолодження» дозволяє оцінити ефективність роботи теплоакуючої рідини. Дослід № 1 є найменш ефективним, оскільки вимагає значного підведення енергії при мінімальному часі акумуляції. Найбільш ефективними є Дослід №10, оскільки має найменше значення співвідношення, в цілому це 34,8%. Тобто, при проведенні подальших досліджень ксантанова камедь є однією з пріоритетних складових, рис. 22. Дослід №2, який демонструє відмінність від №1 на 25,6%, як правило, використовується системах опалення приватних будинків і є ефективним. Досліди №4, №5 і №9 мають подібні результати 31,6%, 29,5% і 28,3%, відповідно.

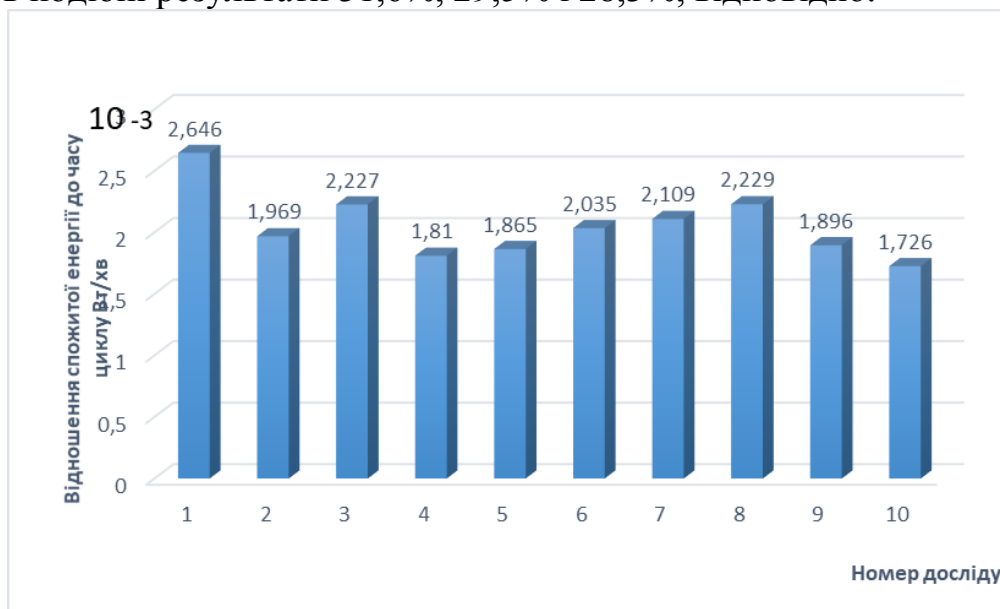


Рис. 22. Відношення спожитої енергії до тривалості циклу нагрів-охолодження.

Проведені експериментальні дослідження дозволили зробити наступні висновки:

- теплоакумулююча рідина, окрім води і антифризу має містити гуарову камедь, оскільки вони дозволяють створити речовину, що значно подовжує строк зберігання теплоти у порівнянні з водою на 15% ... 24%;

- найменше енергоспоживання на цикл відзначено при додаванні ксантанової камеді, цей показник знижується відносно енергоспоживання води на 27,3%. При співвідношенні витраченої енергії до часу проведення циклу термоциклювання ця тенденція зберігається і становить 34,8%;

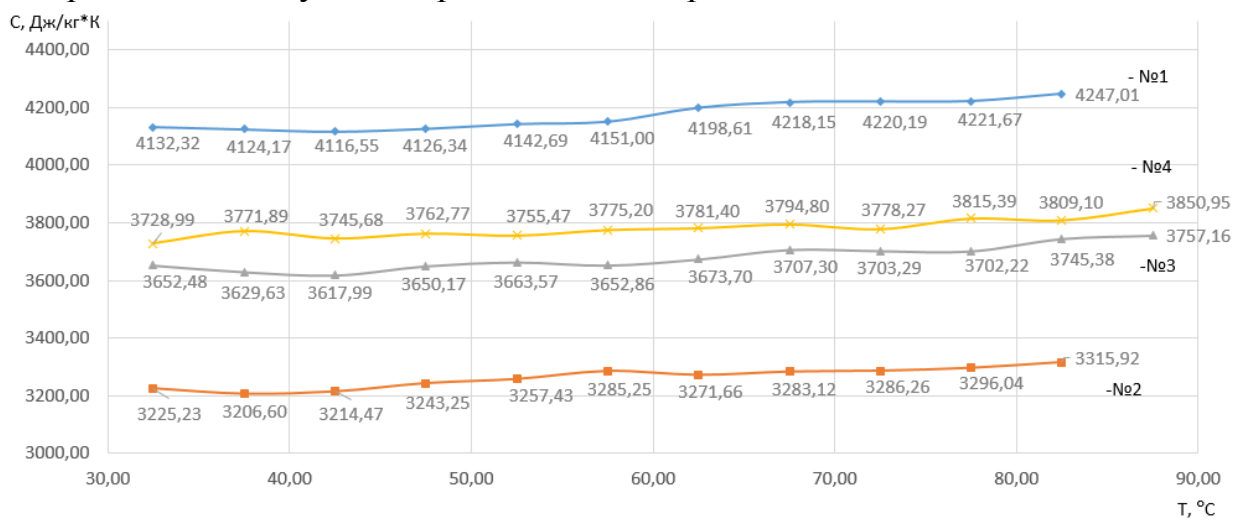
- при тривалому термоциклюванні церезину до 100 циклів, що заповнює «теплове ядро» в конструкції мобільного теплового акумулятора, відбуваються зміни в масі РСМ до 2%, що свідчить про безпечність і надійність його використання-

В результаті проведених експериментальних досліджень встановлено доцільність використання у складі теплоакумулюючої рідини – воду, антифриз, ксантанову і гуарову камеді. Визначення концентрацій зазначених величин стануть предметами подальших досліджень

2. Дослідження теплофізичних параметрів теплоакумулюючої рідини

Вимірювання питомої теплоємності проводились для діапазону температури зразка від 30°C до 100°C; різниця температур між інтервалами – 5 К; тривалість інтервалу – 25 хв. Температура віднесення значення теплоємності при підвищенні температури зразка на один крок приймається як середня температура між кроками.

Для досліджень теплофізичних величин відібрали воду, як контрольний зразок (№1), зразок теплоакумулюючої рідини після 4 опалювальних сезонів (№2), зразок теплоакумулюючої рідини після 2 опалювальних сезонів (№3) та тільки створена рідина до термоциклювання (№4). Результати досліджень теплоємності зразків з різними термінами експлуатації представлено на рис. 23.



1 – вода (контрольний зразок), 2 – зразок теплоакумулюючої рідини після 4 опалювальних сезонів, 3 – зразок після 2 опалювальних сезонів, 4 – зразок до термоциклювання.

Рис. 23. Зміна питомої теплоємності теплоакумулюючої рідини.

За результатами досліджень питомої теплоємності теплоакумулюючої рідини у порівнянні з водою, до термоциклювання має меншу теплоємність у межах від 9,35% до 10,3%. Також встановлено, що відбувається поступове зниження теплоакумулюючої здатності зразків. Після двох опалювальних періодів зниження відбува-

ється у межах від 2,06% до 2,97%, після чотирьох періодів – від 12,97% до 13,6% у порівнянні з теплоакумулюючою рідиною до термоцикування.

В результаті експериментальних досліджень встановлено строк експлуатації теплоакумулюючої рідини у теплових акумуляторах ємнісного типу об'ємом 1,5 м³ не менше 2 років.

Результати досліджень водневого показника та густини теплоакумулюючої рідини зразків з різними термінами експлуатації представлено на рис. 24 та рис. 25, відповідно.

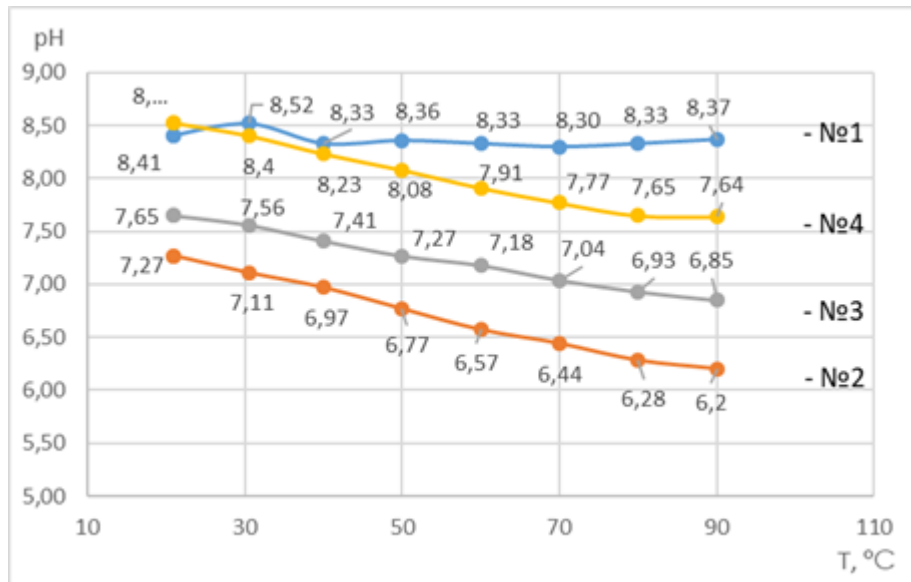


Рис. 24. Дослідження водневого показника теплоакумулюючої рідини в залежності від температури.

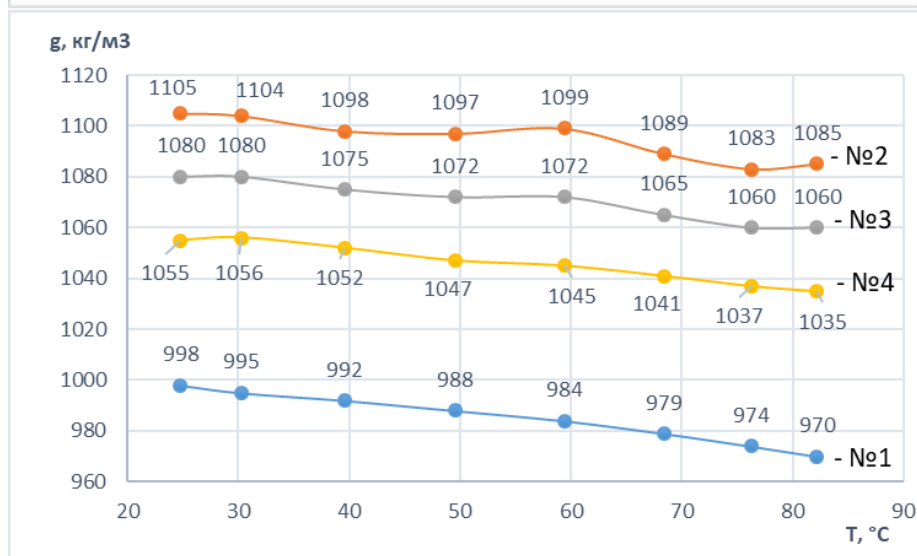


Рис. 25. Дослідження густини теплоакумулюючої рідини в залежності від температури.

В результаті комплексних експериментальних досліджень встановлено, що при експлуатації теплоакумулюючої рідини на основі водорозчинних полімерів рослинного походження у діапазоні температур від 20°C до 90°C протягом чотирьох опалювальних сезонів: водневий показник залишається нейтральним, густина змінюється в межах 1–2%.

Досліджені показники не мають обмежуючого характеру при експлуатації мобільного теплового акумулятору МТА-0,5МВт і теплоакумулююча рідина не потребує заміни протягом, що найменше, 2-4 опалювальних сезонів. Це важливий економічний показник, з огляду на вартість і складність робіт по його заміні.

Під час створення теплоакumuлюючої рідини виникли низка проблем пов'язаних з рівномірним розчиненням водорозчинних полімерів у воді та антифризі, тому виникла необхідність розробки методики проведення створення даної рідини. Було запропоновано створити мобільний технологічний комплекс, який передбачає використання поетапний процес перемішування, що дозволить заощадити витрати електроенергії за рахунок зменшення часу розчинення порошкової суміші, рис. 26.

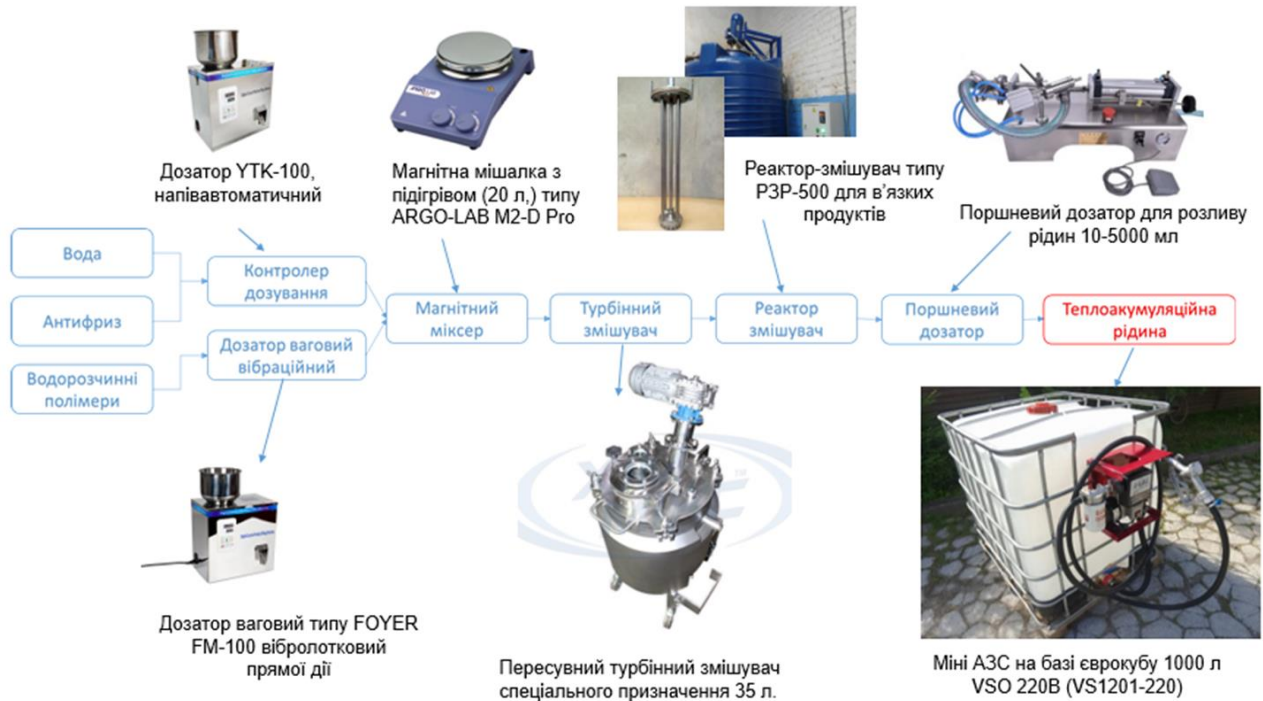


Рис. 26. Основні засоби технологічного оснащення мобільного технологічного комплексу.

У *п'ятому розділі* представлено результати досліджень зв'язку наноструктур у теплоакumuлюючій рідині з застосуванням дворівневої моделі формування багатокомпонентних наноструктур. При комплексному застосуванні методів MD і DPD, що утворюють дворівневу математичну модель проведено розрахунок взаємодії частинок рідина-рідина, колоїд-колоїд та колоїд-рідина.

Для врахування роботи сил притягання потрібно застосувати метод молекулярної динаміки. Метод MD ґрунтується на застосуванні потенціалів Леннарда-Джонса, що враховує сили притягання і відштовхування між частинками. Потрібно зауважити, що метод DPD застосовується для мезомасштабних розрахунків, а метод MD використовується для моделювання явищ на рівні атомарних масштабів.

З урахуванням особливостей методів що застосовуються MD і DPD, дворівнева модель може бути представлена для $r_{ij} < r_c$. Математичне моделювання проводиться у безрозмірній формі. Приведення вихідних даних до безрозмірного вигляду у таких масштабах:

- радіус відсікання частинки колоїду прийнято за лінійний масштаб;
- масу частинки колоїду приймаємо за одиницю маси;
- час проходження частинкою колоїду відстані, що дорівнює її радіусу відсікання прийнято якості масштабу часу.

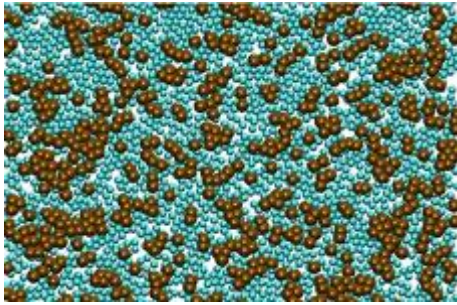
$$F_{ij} = \begin{cases} \frac{24\varepsilon_{ij}}{r_{ij}} \left[\left(\frac{\sigma_{ij}}{r_{ij}} \right)^6 - 2 \left(\frac{\sigma_{ij}}{r_{ij}} \right)^{12} \right], & \text{для } i \text{ або } j \text{ середовище – колоїд} \\ \pi\omega_1(r_{ij}) - \gamma_{ij}m_i\omega_2(r_{ij})(\mathbf{v}_{ij} \cdot \mathbf{e}_{ij}) + \delta_{ij}\theta_{ij}/\sqrt{\Delta t} \cdot \omega_1(r_{ij}) & \text{для } i \text{ або } j \text{ – рідина} \end{cases} \quad (46)$$

За умови $F_{ij}=0$ для $r_{ij}>r_c$, де r_{ij} – відстань між атомами, ε - мінімум енергії взаємодії, характеризується глибина потенційної ями, σ_{ij} – мінімальна відстань між атомами. Результати комп'ютерного моделювання представлено на рис. 27-29 (а) та порівняно з реальними зображеннями теплоакумулюючої рідини фото (б).

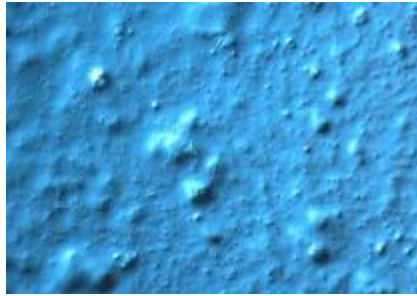
Розрахункова конфігурація

Фото структури в темному полі

Співвідношення потенціалів взаємодії



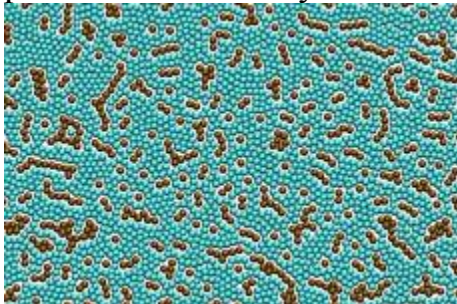
а



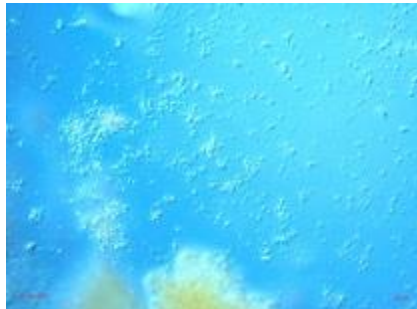
б)

$$\varepsilon_{C-C}/\varepsilon_{C-S}=0,8/0,7$$

Рис. 27. Глобулярні структури в системі теплоакумулюючої рідини до її застосування.



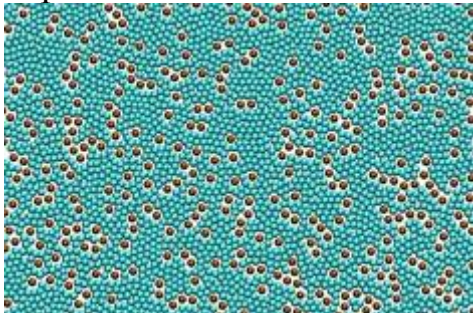
а)



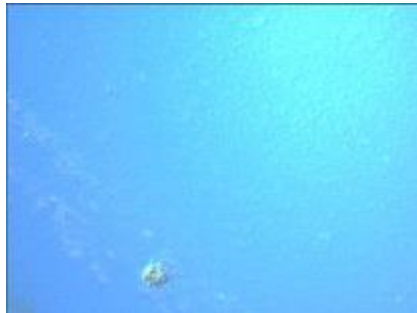
б)

$$\varepsilon_{C-C}/\varepsilon_{C-S}=0,95/1,3$$

Рис. 28. Розрізнені структури в системі теплоакумулюючої рідини після її застосування протягом 2-ох опалювальних періодів.



а)



б)

$$\varepsilon_{C-C}/\varepsilon_{C-S}=1,5/1,3$$

Рис. 29. Розрізнені структури в системі теплоакумулюючої рідини після її застосування протягом 4-ох опалювальних періодів.

У шостому розділі представлено вибір та дослідження теплофізичних параметрів матеріалів з фазовим переходом для застосування в «тепловому ядрі», що

можуть бути використані при мобільному тепловому акумулюванні в діапазоні температур від 30°C до 90°C.

В результаті аналізу літературних джерел було обрано для подальших досліджень зразки природних восків – озокериту, церезину, петролатуму. Оскільки фазовий перехід даних речовин здійснюється в межах роботи створюваного мобільного теплового акумулятору, а також їх безпечністю, екологічністю, економічною доцільністю та доступністю на ринку України.

Дослідження теплоємності зразків РСМ проводились з використанням диференціального мікрокалориметра ДМКИ-1. Було проведено цикл з трьох досліджень для кожного зразка за однакових умов проведення експерименту. Отримані дані для кожного зразка представлені як середнє значення теплоємності матеріалу в температурному діапазоні від 30°C до 105°C.

Результати вимірювань питомої теплоємності зразків в діапазоні температури від 30°C до 105°C наведені на рис. 30.

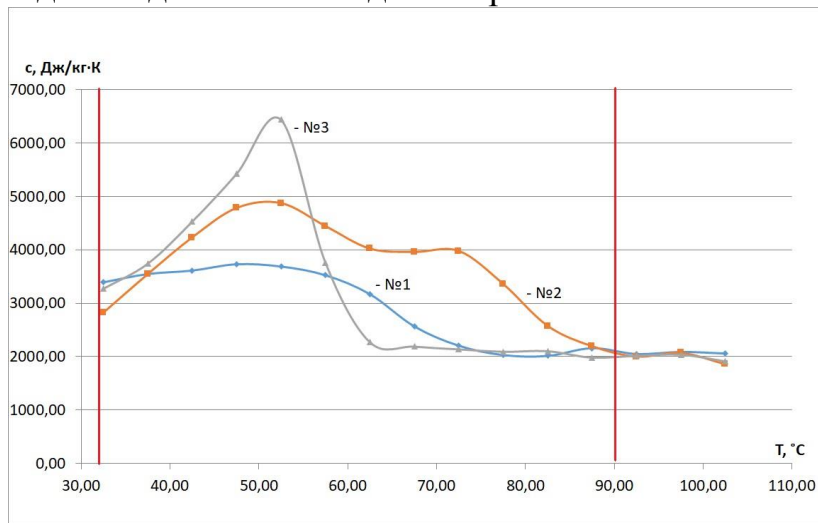


Рис. 30. Залежність питомої теплоємності речовин від температури: петролатум (№1), церезин (№2), озокерит (№3).

клування методом T-history. Отримані результати питомої теплоємності церезину до і після 85 циклів термоцикування представлено на рис. 31.

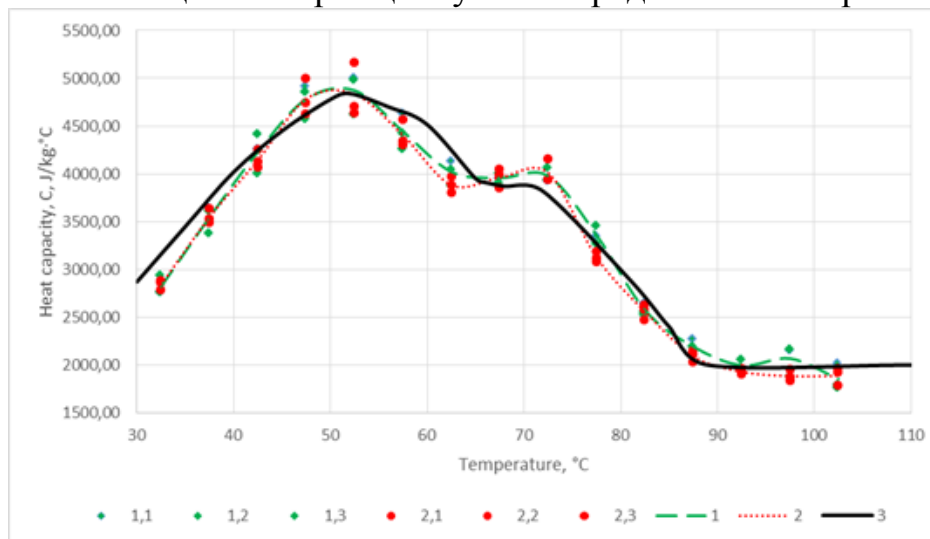


Рис. 31. Залежність питомої теплоємності церезину від температури: 1 – результати експериментальних досліджень церезину до початку термоцикування; 2 – результати експериментальних досліджень церезину після 85 циклів «нагріву/охолодження»; 3 – розрахункова апроксимація залежності зразка

Отже отримані результати досліджень, свідчать що при багаторазовому нагріві і охолодженні церезин не втрачає своєї акумуляційної здатності і може бути використаний в «тепловому ядрі» для подолання ефекту стратифікації.

Для визначення теплоти фазового переходу кожного з зразків було проведено за допомогою графічно-аналітичного методу відповідні розрахунки. В результаті теплота фазового переходу церезину перевищує значення теплоти фазового переходу зразків петролатуму і озокериту на 32,06 % та 51,6%, відповідно. Для використання у «тепловому ядрі» обрано церезин.

У *сьомому розділі* дисертаційної роботи представлено створення дослідного зразка мобільного теплового акумулятора та дослідження акумуляції теплової енергії та його технічних характеристик. А саме, представлено загальну схему розробленої робочої конструкторської документації призначеної для виготовлення та випробування дослідного зразка МТА-0,5МВт. Приведено опис загальної та технологічної схем МТА та проектування блочного індивідуального теплопункту (ІТП), рис. 32.

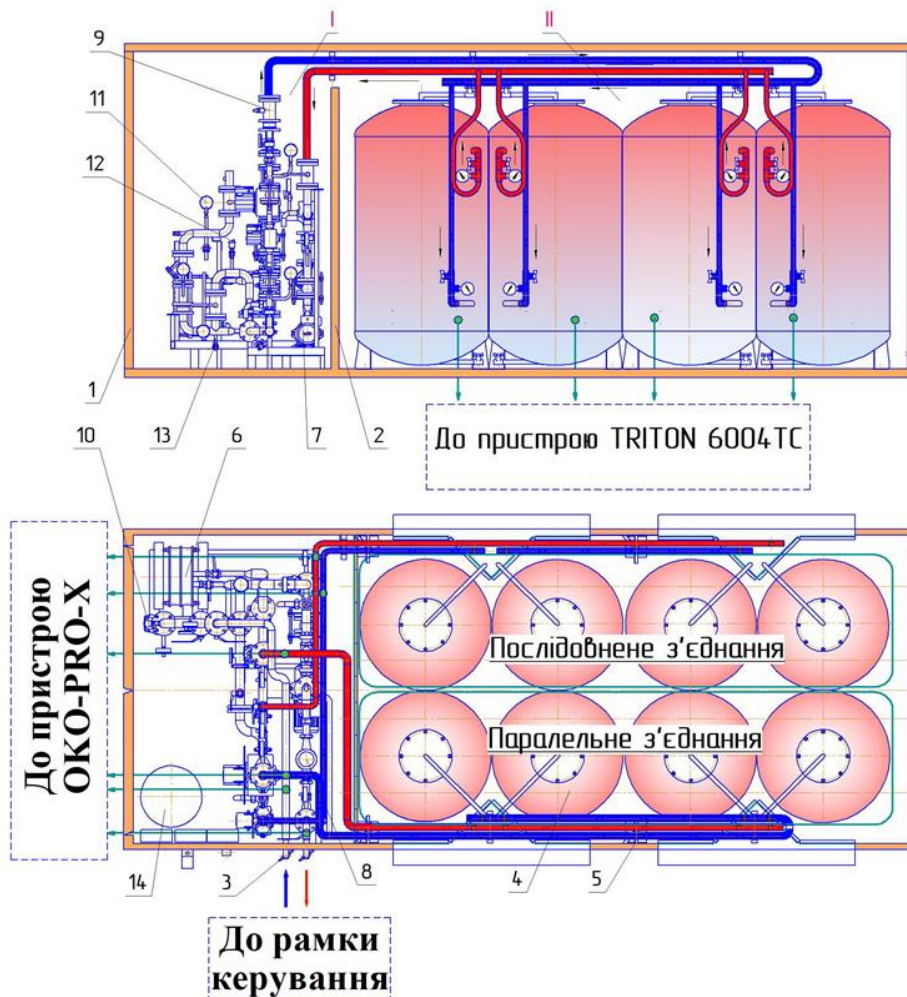


Рис. 32. Дослідний зразок мобільного теплового акумулятора МТА-0,5 МВт.

Дослідний зразок мобільного теплового акумулятора МТА-0,5МВт розміщено у стандартному 20 футовому контейнері 1, який розділено перегородкою 2 на 2 секції – гідравлічну (I) та акумуляційну (II).

В гідравлічній секції (I) встановлено індивідуальний тепловий пункт – це контур системи теплопостачання, що приєднується до джерела і споживача теплопоста-

чання за незалежною схемою включає: розбірний пластинчастий теплообмінник 6, на основі пластин фірми «Funke»; циркуляційні насоси «Wilo» 7; тепловий лічильник SKYLAR INT 8 в комплекті з витратоміром та термоперетворювачами опору; запірну арматуру 9, сітчастий фільтр 10 та контрольно-вимірювальні прилади 11; запобіжно-скидний клапан 12 та інше допоміжне обладнання.

В ІТП встановлено вимірювально-реєструючі прилади, що забезпечують моніторинг температури, теплової енергії та інших технічних параметрів з застосуванням спеціалізованих контролерів типу GSM-сигналізації ОКО-PRO-X.

II секція акумуляційна – забезпечує акумуляційні процеси МТА і складається з восьми ємнісних акумуляторів 4 оригінальної конструкції. Ємнісні акумулятори з'єднані паралельно (II а) і послідовно (II б) за допомогою системи трубопроводів 5. На трубопроводі розташовано запірно-регулювальне обладнання та вимірювальні прилади.

Проведено розрахунки і результати експериментальних досліджень для визначення параметрів роботи і конструктивних розмірів ІТП, тепловий та гідравлічний розрахунок ІТП, швидкість заряду та розряду теплових акумуляторів.

Запропоновано два типи застосування матеріалу з фазовим переходом для подолання теплової стратифікації, що виникає по висоті ємностей – природного походження, було обрано церезин (рис. 33) та штучні у вигляді капсул (рис. 34).

Тепловий акумулятор ємнісного типу має ємність (корпус) 1 заповнену теплоакумуючою рідиною. Ємність обладнана «змієвиком» теплообмінником 2 в якому рухається теплоносій - вода. У верхній частині ємності 1 розташовано технологічний люк 3. По центру ємності 1 встановлено «теплове ядро» 4 заповнене РСМ - церезином.

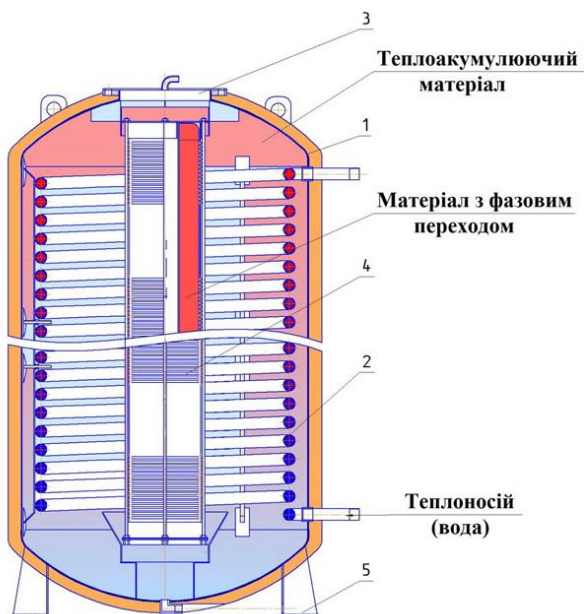


Рис. 33. Акумулятор ємнісного типу з РСМ у «тепловому ядрі» церезином.

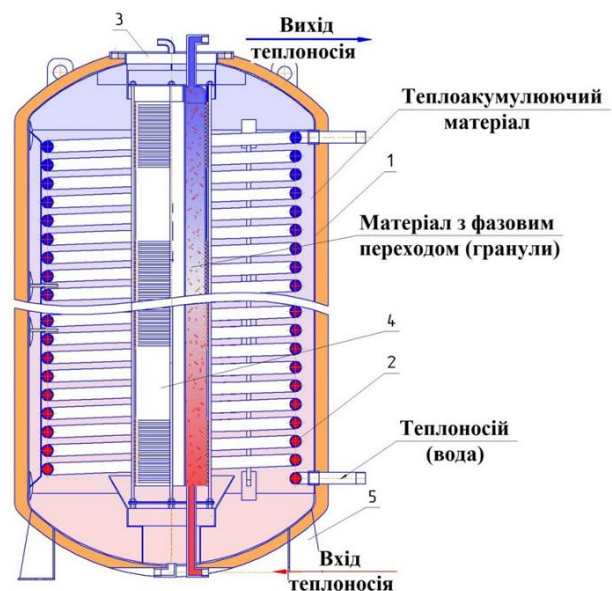


Рис. 34. Акумулятор ємнісного типу з РСМ в «тепловому ядрі» у вигляді гранул.

Для забезпечення теплової потужності мобільного акумулювання проведено визначення основних параметрів ємності акумулятора та розрахунок теплових навантажень МТА. Основні результати розрахунку наведено у табл. 2.

Таблиця 2. Розрахункові параметри акумуляційних ємностей без урахування «теплового ядра»

Об'єм ємності, л	500	1000	1500	2000
Маса m_{H_2O} , кг	488,9	977,8	1466,7	1955,6
Маса $m_{ТАМ}$, кг	580,0	1160,0	1740,0	2320,0
Теплове навантаження Q_{H_2O} , МДж	81,88	163,8	245,64	327,5
Теплове навантаження $Q_{ТАМ}$, МДж	91,87	183,7	275,62	367,5
Потужність q_{H_2O} , кВт/ГОД	22,74	45,5	68,23	90,98
Потужність $q_{ТАМ}$, кВт/ГОД	25,52	51,0	76,56	102,08
Теплова потужність МТА за H_2O , МВт	0,182	0,364	0,546	0,723
Теплова потужність МТА за ТАМ, МВт	0,204	0,408	0,613	0,82
Час розрядки МТА τ_{H_2O} , год	109 хв	218 хв	328 хв	433 хв
Час розрядки МТА $\tau_{ТАМ}$, год	120 хв	240 хв	368 хв	492 хв

Для визначення міцності і надійності обраної конструкції приведено розрахунок напружено-деформованого стану на міцність ємності-акумулятора при транспортуванні.

На рис. 35. представлено розрахункові значення часу зарядки в залежності від температури джерела. Так при температурі теплоносія джерела 100°C , зарядка здійснюється протягом 3 годин. Процес розрядки отримано експериментальним шляхом. В процесі «простоя» температура в МТА фактично не змінюється, а розрядка триває протягом 10...12 годин, рис. 36.

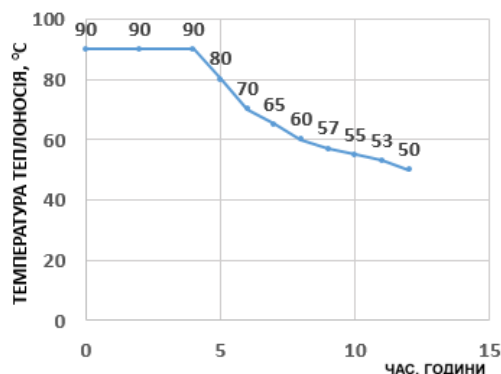
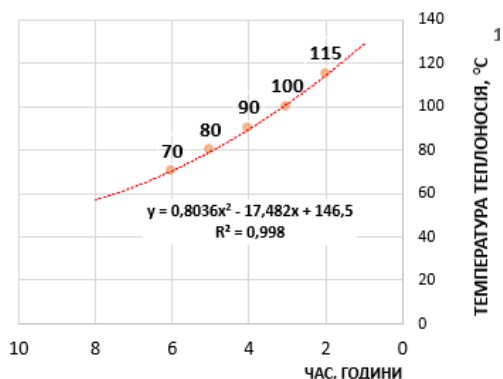


Рис.35. Час зарядки МТА-0,5 МВт, в залежності від температури теплоносія джерелом 100 кВт, (12,0 тон теплоакуюлюючої рідини до 90°C).

Рис.36. Час розрядки МТА-0,5 МВт, в залежності від температури теплоносія (споживач 0,1 МВт-год).

В результаті комплексних експериментальних досліджень встановлено основні технічні параметри мобільного теплового акумулятора МТА-0,5МВт, табл.3.

Таблиця 3. Технічні характеристики мобільного теплового акумулятора МТА - 0,5МВт

Параметр, одиниця вимірювання	Значення
Теплова потужність МТА, МВт, не більш	0,78
Тиск в ємностях та лініях зв'язку, Р, МПа, не більш	0,07
Продуктивність насоса теплоносія контуру нагрів/охолодження, м ³ /год до	4,5
Потужність електрична встановлена, кВт, не більш	8,75
Температура теплоносія в контурі ємностей (при заряді/при розряді), °С	90/50
Температура теплоносія при заряді МТА:	
• прямого теплоносія при заряді МТА, °С	115
• зворотного теплоносія при заряді МТА, °С	60
Температура теплоносія при розряді МТА	
• прямого теплоносія при розряді МТА, °С	50
• температура зворотного теплоносія при розряді МТА, °С	30
Об'єм теплоакumuлюючої рідини в одній ємності, м ³ , до	1,5
Об'єм теплоакumuлюючої рідини в МТА в цілому, м ³ , до	12,0
Габаритні розміри МТА (довжина x ширина x висота) мм, не більше:	6058 x 2438 x 2896
Площа відсіку блочного ІТП (довжина x ширина x висота) мм, не більше:	1500 x 2000 x 3000
Займана виробнича площа, м ² , не більше	26,52
Маса, кг, не більше	17500
Система автоматичного моніторингу передбачає наявність пристрою	ОКО PRO-X
Режим роботи	періодичний, циклічний

Створений мобільний тепловий акумулятор пройшов апробацію протягом 2-ох опалювальних сезонів в ІТТФ НАНУ, були досліджені технічні параметри роботи МТА обладнання. Відпрацьовано основні режими роботи мобільного теплового акумулятора. У 2022 році МТА було передано в Медико-реабілітаційний центр МВС України «Кремінці» в якому проходять реабілітацію захисники України після отриманих поранень. Використання МТА дозволило забезпечити стале теплопостачання під час аварійних відключеннях в корпус МРС МВС України та заощадити 2700кВт·год (13867грн у грошовому еквіваленті) за опалювальний період 2022-2023рр. (Акт впровадження мобільного теплового акумулятора МТА-0,5МВт від 28 квітня 2023, Договір №11-22/927 від 9.12.2022 «Проведення дослідної експлуатації»).

Проведено попередню оцінку інтегральних показників економічної ефективності за двома сценаріями реалізації проєкту при тепловій потужності дослідного зразка мобільного теплового акумулятора 0,5 МВт (проєктне значення) та 0,78МВт

(встановлене значення), у результаті орієнтовні точки беззбитковості становлять 3594827,0 грн та 5650966,0 грн, відповідно.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

1. В результаті проведеного аналізу сучасного стану транспортування теплової енергії за допомогою мобільних теплових акумуляторів, було встановлено технічні параметри створення такого обладнання з використанням низькопотенційної енергії, а також необхідність створення теплоакумуючої рідини та її теплофізичні параметри;

2. Розвинуто концептуальний підхід для визначення основних технологічних параметрів мобільного теплового акумуляування на основі проведеного аналітичного моделювання тепломасообмінних та гідродинамічних процесів для оптимізації конструкції мобільного теплового акумулятора, а саме:

- Проведено аналітичне дослідження процесу теплообміну в середині «теплового ядра» заповненого матеріалом з фазовим переходом. Отримано рівняння швидкості нагрівання матеріалу з фазовим переходом всередині «теплового ядра» враховуючи радіальне перенесення теплоти. Отримано теоретичні залежності теплоємності матеріалу з фазовим переходом при зміні температури. Розбіжність отриманих результатів з експериментальними даними знаходиться в межах 7%.

- розвинуто теорію задач радіаційно-конвективного теплообміну при плівковому кипінні рідини на вертикальній нагрітій пластині. Досліджено стаціонарну та не-стаціонарну задачі теплообміну, з урахуванням що остання описує миттєве (вибухове) кипіння рідини на нагрітій поверхні. Отримано аналітичний розв'язок задач стаціонарного режиму для граничних умов, що містять постійну температуру стінки та постійний тепловий потік стінки. В результаті вирішення нестационарної задачі отримано залежну від часу зміну профілю температури та коефіцієнта тепловіддачі в паровій плівці. Показано вплив випромінювання на коефіцієнт тепловіддачі. Показано суттєва нелінійність профілю температур та збільшення виходу часу на стаціонарний режим з ростом значення числа Старка.

- застосовано нестационарну модель осцилюючого потоку рідини у плоских та циліндричних каналах у пористих середовищах. Аналітичне рішення профілів швидкості та витрат (продуктивності) порівняно з чисельними результатами, одержаними за допомогою LBM. Показано, що поведінка осцилюючого потоку рідини при впливі осцилюючого градієнта потенціалу визначається двома безрозмірними параметрами чисел Струхаля та Дарсі. Зі збільшенням значення частоти (число Струхаля) у каналах максимум опосередкованого за період коливань потоку частинок зміщується від центру до периферії. Зі зростанням кількості осциляцій зростає хаотичність руху носіїв та кількість їх зіткнень, що також призводить до зростання опору. Збільшення параметра Дарсі тобто зменшення впливу зіткнень носіїв, призводить до збільшення витрати потоку (збільшується продуктивність обладнання).

3. Створено вибухо- і пожежобезпечну теплоакумуючу рідину на основі водорозчинних полімерів та досліджено її теплофізичні властивості.

4. Експериментально доведено, що гуарова камедь подовжується термін зберігання теплоти в порівнянні з водою на 15% ... 24%. Ксантанова камедь, дозволяє зменшити енергоспоживання за цикл відносно зразка з водою на 27,3%. При збере-

женні відношення витраченої енергії до часу циклу термоцикування ця тенденція зберігається і становить 34,8%.

5. В результаті досліджень доведено, що питома теплоємність теплоакumuлюючої рідини протягом чотирьох опалювальних сезонів та теплоакumuлюючої рідини до термоцикування у порівнянні з водою знижується у межах від 9,35% до 10,3%. Встановлено, що відбувається поступове зниження теплоакumuлюючої здатності зразків в процесі експлуатації. Після двох опалювальних періодів зниження відбувається у межах від 2,06% до 2,97%, після чотирьох періодів – від 12,97% до 13,6 % у порівнянні з теплоакumuлюючою рідиною до термоцикування. Отже, строк експлуатації теплоакumuлюючого матеріалу у теплових акумуляторах ємнісного типу об'ємом 1,5 м³ не менше 2 років.

6. Використовуючи комбіновану модель, що об'єднує методи молекулярної динаміки та дисипативної динаміки частинок, виявлено, що форми колоїдних структур залежать від потенціалів взаємодії частинок рідина-колоїд та колоїд-колоїд.

7. Розроблено технологічні основи процесу приготування універсальної вибухопожежобезпечної теплоакumuлюючої рідини. Запропоновано створення мобільного технологічного комплексу, здійснено вибір відповідного обладнання.

8. На основі проведеного аналізу ринку підібрано і досліджено теплофізичні властивості теплоакumuлюючого матеріалу з фазовим переходом для «теплого ядра» ємнісного акумулятора, а саме обрано матеріал з фазовим переходом церезин.

9. Розроблено концепт мобільного транспортування теплової енергії з застосуванням мобільних теплових акумуляторів МТА-0,5МВт з латентним зберіганням теплової енергії за допомогою безпечних теплоакumuлюючих рідин і матеріалів з фазовим переходом, що забезпечує підвищення акумуляційної здатності МТА на 56% у порівнянні з застосуванням води у якості теплоакumuлюючої рідини.

Перелік умовних позначень: c_p – теплоємність, Дж/кг·К; Da – число Дарсі; F_o – число Фур'є; ρ – густина, кг/м³; H – висота циліндрів, м; h – півширина каналу, м; Ja – число Якоба; K – проникність пористого середовища; k – коефіцієнт теплопередачі, Вт/м²; K ; L – довжина проковзування, м; Nu – число Нуссельта; p – тиск, Па; pH – водневий показник; r – радіальна координата; r_{ij} – відстань між атомами; R – радіус каналу циліндричного перерізу, м; Ra – число Релея; Sr – число Старка; Sh – число Струхалія; T, t – температура, °С; u – поздовжня швидкість, м/с; v – кінематична в'язкість, м²/с; x, y – поздовжня та поперечна координата; α – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/м² К; β – емпіричний коефіцієнт; δ_m – товщина стінки, мм; ε – мінімум енергії взаємодії, характеризується глибина потенційної ями; η – самоподібна змінна; λ_m – коефіцієнт теплопровідності матеріалу, Вт/(м·К); ϑ – безрозмірна температура; ϕ – пористість; σ_{ij} – мінімальна відстань між атомами; τ – час, с.

СПИСОК ПРАЦЬ, ОПУБЛІКОВАНИХ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації

Монографії:

1. Demchenko V., Konyk A., Dekusha O. (2023). *Thermal Energy Storage Systems in the District Heating Systems*. Systems, Decision and Control in Energy. 481, 371-384. Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-35088-7_19 (SCOPUS, Q3, On-line ISBN 978-3-031-35088-7, Print ISBN 978-3-031-35087-0) (Поз-

діл колективної монографії. *Особистий внесок здобувача полягає в проведенні аналізу літературних джерел стосовно методів і способів акумуляції, постановки проблеми, вибору методу акумуляції для ємнісного обладнання).*

Статті у фахових виданнях України:

2. Демченко В.Г., **Коник А.В.**, Фалько В.Ю. (2020). Мобільні теплові акумулятори. *Вісник Національного технічного університету: Серія «Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування»*, 1(3), 30-34. <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2021.03.06> (**Фахове видання категорія Б**, On-line ISSN: 2707-7543, Print ISSN 2078-774X). (*Особистий внесок здобувача полягає в постановці задачі, огляді технічних й технологічних аспектів застосування мобільних теплових акумуляторів*).

3. Демченко В.Г., **Коник А.В.** (2020). Основні аспекти процесів теплоакмулювання. *Наукові праці*, 1(84), 48-53. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v84i1.1868> (**Фахове видання категорія Б**, On-line ISSN 2414-0295, Print ISSN 2073-8730). (*Особистий внесок здобувача полягає в проведенні аналізу основних технічних і технологічних та конструктивних особливостей теплових акумуляторів*).

4. Демченко В.Г., **Коник А.В.** (2020). Зменшення непродуктивних теплових втрат при генерації енергії. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»: Серія «Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування»*, 3, 30-34. <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2020.01.05> (**Фахове видання категорія Б**, On-line ISSN 2707-7543) (*Особистий внесок здобувача полягає в огляді можливості інтегрування мобільних теплових акумуляторів в загальну енергетичну систему з метою подолання непродуктивних витрат при генерації енергії*).

5. Демченко В.Г., Трубачев А.С., **Коник А.В.** (2020). Дослідження напружено-деформованого стану елементів мобільного теплового акумулятора. *Теплофізика та теплоенергетика*, 42(2), 68-75. <https://doi.org/10.31472/ttpe.2.2020.7> (**Фахове видання категорія Б**, On-line ISSN 2663-7243, Print ISSN 2663-7235). (*Особистий внесок здобувача полягає в постановці задачі досліджень напружено-деформованого стану та аналізі отриманих даних*).

6. Демченко В.Г., **Коник А.В.**, Хоменко М.В. (2021). Дослідження теплових характеристик електричних опалювальних приладів. *Теплофізика та теплоенергетика*, 43(2), 41-49. <https://doi.org/10.31472/ttpe.2.2021.5> (**Фахове видання категорія Б**, On-line ISSN 2663-7243, Print ISSN 2663-7235). (*Особистий внесок здобувача полягає в постановці задачі досліджень, обробці і аналізі отриманих результатів, та наданні рекомендацій стосовно ефективності застосування опалювальних приладів*).

7. Демченко В.Г., **Коник А.В.**, Погорєлова Н.Д. (2022). Розробки з підвищення ефективності теплопостачання в теплоенергетиці. *Теплофізика та теплоенергетика*, 44(3), 73-83. <https://doi.org/10.31472/ttpe.3.2022.7> (**Фахове видання категорія Б**, On-line ISSN 2663-7243, Print ISSN 2663-7235). (*Особистий внесок здобувача полягає в проведенні дослідницької роботи щодо застосування МТА-0,5МВт, створенні і дослідженні теплофізичних характеристик теплоаккумуляційної рідини*).

8. Демченко В.Г., **Коник А.В.**, Хоменко М.В. (2022). Мобільний технологічний комплекс для приготування водорозчинних полімерів. *Scientific Works*, 86(1), 125-132. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v86i1.2414> (**Фахове видання категорія Б**, Print ISSN 2073-8730). (*Особистий внесок здобувача полягає в формуванні техноло-*

гічного процесу змішування/розчинення водорозчинних полімерів при створенні теплоаккумуляційної рідини).

9. Demchenko V., **Konyk A.V.**, Dekusha H. (2023). Determination of components for heat storage material. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 4th International Conference on Sustainable Futures: Environmental, Technology, Social and Economic Matters (ICSF-2023)*, 22-26 травня 2023, Кривий Ріг, 1254, 012033. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1254/1/012033> (SCOPUS Q3, On-line ISSN 1755-1315, Print ISSN 1755-1307). (Особистий внесок здобувача полягає в постановці задачі досліджень, виборі методик досліджень, проведенні експериментальних досліджень та аналізі отриманих результатів).

10. Ivanitsky G.K., **Konyk A.V.**, Stepaniuk A.R., Demchenko V.G. (2023). Моделювання процесів теплообміну в «тепловому ядрі» заповненого теплоаккумуляційним матеріалом. *Energy Technologies & Resource Saving*, 76(3), 58-70. <https://doi.org/10.33070/etars.3.2023.05> (SCOPUS Q4, On-line ISSN 2664-3561, Print ISSN 2413-7723). (Особистий внесок здобувача полягає в постановці проблеми, проведенні аналітичних і експериментальних досліджень, аналізі отриманих результатів).

11. Демченко В.Г., **Коник А.В.**, Погорелова Н.Д., Хоменко М.В. (2024). Розрахунок об'ємної втрати природного газу через нещільності з'єднань в трубопроводі. *Теплофізика та теплоенергетика*, 46(1), 58-65. <https://doi.org/10.31472/ttpe.1.2024.8> (Фахове видання категорія Б, On-line ISSN 2663-7243, Print ISSN 2663-7235). (Особистий внесок здобувача полягає в постановці проблеми і аналізі можливих втрат)

12. **Коник А.В.**, Декуша Г.В. (2024). Дослідження теплофізичних характеристик теплоаккумуляційного матеріалу. *Scientific Works*, 88(1), 57-62. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v88i1.2961> (Фахове видання категорія Б, Print ISSN: 2073-8730). (Особистий внесок здобувача полягає в постановці задачі досліджень, виборі методик досліджень, проведення експериментальних досліджень, аналізі отриманих результатів).

Статті у наукових періодичних виданнях інших держав з напрямку за яким підготовлено дисертацію

13. Demchenko V.G., Tselen B.J., **Konyk A.V.**, Ivanov S.O. (2020). Research of thermal cycling of organic substances with phase transition, *Scientific discussion / Praha, Czech Republic*, 1, 41, 54-58. (Фахове іноземне видання, ISSN 3041-4245). (Особистий внесок здобувача полягає в постановці задачі досліджень, вибір методик досліджень, аналізі отриманих результатів).

14. Demchenko V.G., **Konyk A.V.** (2020). Research of heat accumulation capacity binary water systems. *IOSR Journal of Applied Chemistry*, 13(6), I, 1-7. <https://doi.org/10.9790/5736-1306010107> (Фахове іноземне видання, On-line ISSN 2278-5736). (Особистий внесок здобувача полягає в постановці задачі досліджень, проведенні експериментальних досліджень, аналізі і обробка отриманих результатів).

15. **Konyk A.**, Demchenko V. (2021). Integration of heat storage technologies in district heating systems. *Rocznik Ochrona Srodowiska*, Poland, 23, 493-502. <https://doi.org/10.54740/ros.2021.034> (SCOPUS Q4, On-line ISSN 1506-218X). (Особистий внесок здобувача полягає в проведенні аналізу літературних джерел, можли-

вість і перспективи застосування мобільного теплового акумулятору МТА-0,5МВт).

16. **Konyk A.V.**, Demchenko V.V. (2021). Integration of heat storage technologies in central heating systems. *Journal of New Technologies in Environmental Science*, 1, 3-10. <https://doi.org/10.53412/jntes-2021-1.1> (Фахове іноземне видання, On-line ISSN 2544-7017). (Особистий внесок здобувача полягає в постановці задачі інтегрування мобільних теплових акумуляторів в загальну енергетичну систем)

17. Demchenko V.G., **Konyk A.V.** (2022). Mobile thermal energy storage (M-TES). *Journal of New Technologies in Environmental Science*, 3, 91-96. <https://doi.org/10.53412/jntes-2022-3-2> (Фахове іноземне видання, On-line ISSN 2544-7017). (Особистий внесок здобувача полягає в проведенні огляду світового досвіду створення мобільних теплових акумуляторів та створенні нової конструкції МТА-0,5МВт).

18. Avramenko A.A., Tyrinov A.I., Kovetska Yu.Yu, **Konyk A.V.** (2024). Oscillating flow of viscous electron fluids. *Chinese Journal of Physics*, 87, 635-645. <https://doi.org/10.1016/j.cjph.2023.12.010> (SCOPUS Q1, Print ISSN 2309-9097, On-line ISSN 0577-9073). (Особистий внесок здобувача полягає в постановці проблеми, проведенні аналітичних розрахунків, аналізі отриманих результатів).

19. Avramenko A.A., Shevchuk I.V., Kovetskaya M.M., Kovetska Y.Y., **Konyk A.V.** (2024). Steady and Unsteady Complex Heat Transfer in Optically Thick Medium During Film Boiling. *ASME Journal of Heat and Mass Transfer*. 146(3), 031601 (8 pages). <https://doi.org/10.1115/1.4064274> (SCOPUS Q2, ISSN 2832-8450, ISSN 2832-8469). (Особистий внесок здобувача полягає в постановці проблеми, проведенні аналітичних досліджень та аналізі отриманих результатів).

20. Avramenko A., Shevchuk I., Dmitrenko N., **Konyk A.** (2025). Renormalization group approach as a symmetry transformation for an analysis of non-newtonian elastic turbulence. *Fluids*, 10(4), 79. <https://doi.org/10.3390/fluids10040079> (SCOPUS Q1, On-line ISSN 2311-5521). (Особистий внесок здобувача полягає в аналітичній розробці моделі турбулентності).

21. Avramenko A., Shevchuk I., Kovetskaya M, Kovetska Y., **Konyk A.** (2025). Symmetry analysis of renormalization group approach for analysis of unsteady turbulence Available to Purchase. *Physics of Fluids*, 37, 095194. <https://doi.org/10.1063/5.0290378> (SCOPUS Q1, On-line ISSN 1089-7666, Print ISSN 1070-6631). (Особистий внесок здобувача полягає в аналітичній розробці моделі турбулентності).

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати докторської дисертації

22. Демченко В.Г., **Коник А.В.** Патент на винахід №126579, Україна. МПК F24H7/02, F24D15/02. Акумулятор ємнісного типу; заявник та патентовласник Інститут технічної теплофізики НАН України; заявл. 26.11.2019, опубл. 02.11.2022. Бюл. №44/2022. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1713420/> (Особистий внесок здобувача полягає в проведенні аналізу конструкцій теплових акумуляторів та розробці і верифікації нової конструкції).

23. Демченко В.Г., **Коник А.В.**, Фалько В.Ю. Патент на винахід №128359, Україна. МПК С09К5/00, С09К5/20, С23F11/00. Акумуляційна рідина для систем опалення та охолодження; заявник та патентовласник Інститут технічної теплофізики НАН України; заявл. 24.12.2021; опубл. 19.06.2024, Бюл. №25/2024.

<https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1805576/> (Особистий внесок здобувача полягає в постановці задачі досліджень, виборі компонент теплоакumuлюючої рідини, проведення експериментальних досліджень, аналізі отриманих результатів і визначенні концентрації основних компонент).

24. Смерницький Д.В., Демченко В.Г., **Коник А.В.**, Рябий С.М., Марченко О.Г., Жванко Ю.П. (2023). Багатофункціональний транспортабельний теплоакumuлятор ємнісного типу. Актуальність та доцільність використання в підрозділах системи МВС. *Сучасна спеціальна техніка*, 1, 153-160. (Print ISSN 2411-3816). (Особистий внесок здобувача полягає в розробці технологічних засад і конструктивних особливостей застосування мобільного теплового акumuлятора).

25. Демченко В.Г., **Коник А.В.**, Макаренко Л.А. (2022). Енергетика України на сьогоднішній день. *Проблеми екології та експлуатації об'єктів енергетики. Збірник праць під редакцією О. І. Сігала*, Київ, 27-30. (ISBN 978-966-8449-70-3). (Особистий внесок здобувача полягає в проведенні огляду стану енергетики України на початку військових дій та перспективи розвитку).

Публікації, що засвідчують апробацію матеріалів дисертації. Тези і матеріали конференцій:

26. **Konyk A.V.**, Demchenko V.V. (2021). Integration technologies of heat storage into district heating systems. *V International Scientific-Technical Conference «Actual problems of renewable energy, construction and environmental engineering»*, 3-5 June 2021, Faculty of Environmental, Geomatic and Energy Engineering, Kielce University of Technology, Kielce, Poland, 68-71. (ISBN 978-83-66678-08-8). (Особистий внесок здобувача – співавторство наведених положень)

27. Демченко В.Г., **Коник А.В.** (2021). Техніко-економічне обґрунтування впровадження Дискретної системи постачання теплоти та холоду. *Проблеми екології та експлуатації об'єктів енергетики. Збірник праць під редакцією О.І. Сігала*, Київ, 178–181. (ISBN N 978-966-8449-68-0). (Особистий внесок здобувача – співавторство наведених положень та результатів досліджень)

28. **Коник А.В.**, Демченко В.В. (2021). Сучасні напрямки розвитку теплової енергетики. *Збірник тез доповідей ХХ міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених "Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання"*, 28–29 квітня 2021 р., Київ: НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 47-52. (Особистий внесок здобувача – співавторство наведених положень)

29. Демченко В.Г., **Коник А.В.**, Фалько В.Ю. Стенди та методика проведення досліджень темоциклювання матеріалів з фазовим переходом різної в'язкості. *Збірник тез доповідей ХХІІ міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених "Ресурсенергозберігаючі технології та обладнання"*, 24-26 травня 2022 р., Київ: НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 54-61. (Особистий внесок здобувача – співавторство наведених положень)

30. **Коник А.В.**, Хоменко М.В. (2021). Компактні теплові акumuлятори побутового призначення. *Збірник тез доповідей ХХХ всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених "Обладнання хімічних виробництві підприємств будівельних матеріалів"*, 24–26 травня 2022 р., Київ: НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 15-19. (Особистий внесок здобувача – співавторство наведених положень)

31. Demchenko V.G., **Konyk A.V.** (2022). Mobile thermal energy storage (M-TES). *VI International Scientific-Technical Conference «Actual problems of renewable energy, construction and environmental engineering»*, 24-27 November 2022, Faculty of Environmental, Geomatic and Energy Engineering, Kielce University of Technology, Poland, 41-44. (Особистий внесок здобувача – співавторство наведених положень)

32. **Коник А.В.**, Хоменко М.В. (2022). Конструкції мобільних теплових акумуляторів. *Збірник тез доповідей XXXI всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених «Обладнання хімічних виробництві підприємств будівельних матеріалів»*, 5–7 грудня 2022 р., Київ: НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 17-20. (Особистий внесок здобувача – співавторство наведених положень)

33. **Коник А.В.**, Хоменко М.В. (2023). Потенційні джерела теплоти для живлення мобільного теплового акумулятору МТА-0,5 МВт. *Збірник тез доповідей XXXII всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених «Обладнання хімічних виробництві підприємств будівельних матеріалів»*, 3 травня 2023 р., Київ: НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 128-135. (Особистий внесок здобувача – співавторство наведених положень)

34. Демченко В.Г., **Коник А.В.**, Хоменко М.В. (2023). Огляд і обґрунтування вибору теплоакумуляційного матеріалу для теплових акумуляторів. *Збірник тез доповідей XXIII міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених «Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання»*, 3 травня 2023 р., Київ: НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 136-141. (Особистий внесок здобувача – співавторство наведених положень та результатів досліджень)

35. Демченко В.Г., **Коник А.В.**, Хоменко М.В. (2023). Використання теплових акумуляторів у відновлювальній енергетиці України. Матеріали конференції. Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті: матеріали XXIV міжнародної науково-практичної конференції, 18–19 травня 2023 р., Київ: Інститут відновлюваної енергетики НАН України, 181-183. <https://doi.org/10.36296/renewable.conf.18-19.05.2023>. (Особистий внесок здобувача – співавторство наведених положень)

36. **Коник А.В.**, Хоменко М.В. (2023). Застосування багатофункційного GSM-контролер ОКО-PRO-X в системі автоматичного контролю дослідного зразку МТА-0,5МВт. *Збірник тез доповідей XXXIII всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених «Обладнання хімічних виробництві підприємств будівельних матеріалів»*, 15 грудня 2023 р., Київ: НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 152-155. (Особистий внесок здобувача – співавторство наведених положень)

37. **Коник А.В.**, Іванов С.О. (2024). Дослідження питомої теплоємності теплоакумуляційного матеріалу на основі водорозчинних високомолекулярних вуглеводнів рослинного походження. *Збірник тез доповідей XXVI міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених «Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання»*, 16 травня 2024 р., Київ: НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 112-116. (Особистий внесок здобувача – співавторство наведених положень та результатів досліджень)

38. **Коник А.В.** (2023). Основи застосування методу молекулярної динаміки при моделюванні теплоакумуляційного матеріалу. *Збірник тез доповідей XXVI між-*

народної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених «Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання», 16 травня 2024 р., Київ: НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 132-136.

39. Демченко В.Г., **Коник А.В.** (2023). Багатофункційний транспортабельний акумулятор ємнісного типу. *Збірник тез доповідей всеукраїнської науково-практичної конференції «Актуальні проблеми забезпечення діяльності органів і підрозділів системи МВС України технічними засобами в умовах воєнного стану»*, 26 квітня 2023 р., Київ, 32-34. (Особистий внесок здобувача – співавторство наведених положень)

40. **Коник А.В.** (2024). Дослідження мікроструктури теплоакumuляційного матеріалу. *XX міжнародна наукова конференція «Удосконалення процесів та обладнання харчових та хімічних виробництв»*, 9–13 вересня 2024 р., Одеса: Одеський національний технологічний університет, 6-7.

АНОТАЦІЯ

Коник А.В. Теплофізичні основи систем дискретного опалення з застосуванням теплових акумуляторів ємнісного типу. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.14.06 «Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика». Інститут технічної теплофізики НАН України, Київ.

Дисертаційна робота присвячена розв'язанню актуальних питань розвитку теплофізичних засад теорії процесів мобільного теплового акумуляування та їх апробації в реальних умовах роботи, з застосуванням мобільних теплових акумуляторів, а саме проведено комплекс робіт по створенню мобільного теплового акумулятору МТА-0,5МВт та теплоакumuлюючої рідини.

У роботі проведено аналізу сучасного стану транспортування теплової енергії за допомогою мобільних теплових акумуляторів, наведено теплофізичні параметри акумуляційних рідин та технічні характеристики МТА з подальшим використанням низькопотенційних джерел енергії.

Мета роботи полягає у розвитку теплофізичних засад теорії процесів мобільного теплового акумуляування та їх апробація в реальних умовах роботи мобільного теплового акумулятору МТА-0,5МВт.

У результаті проведеного аналітичного моделювання теплообмасообмінних та гідродинамічних процесів з метою створення конструкції мобільного теплового акумулятору, а саме:

- для дослідження процесів теплообміну і гідродинаміки та встановлення обмежуючих режимів у тепловому акумуляторі ємнісного типу, розвинуто теорію задач радіаційно-конвективного теплообміну при плівковому кипінні рідини на вертикальній нагрійтій пластині. Досліджено стаціонарну та нестаціонарну задачі теплообміну;

- для дослідження процесу акумуляції проведено аналітичне дослідження процесу теплообміну в середині «теплового ядра» заповненого матеріалом з фазовим переходом. Отримано рівняння швидкості нагрівання матеріалу з фазовим переходом всередині «теплового ядра» враховуючи радіальне перенесення теплоти;

- для дослідження процесу гідродинаміки потоку теплоносія розроблено нестационарну модель осцилюючого потоку рідини у плоских та циліндричних каналах у пористих середовищах;
- для створення теплоакumuлюючої рідини застосовано комбіновану модель, що об'єднує молекулярну динаміку та дисипативну динаміку частинок.

Створено нову вибухо-пожежобезпечну теплоакumuлюючу рідину на основі водорозчинних полімерів природнього походження, досліджено її теплофізичні властивості та встановлено строк експлуатації. А також запропоновано технологічну схему мобільного технологічного комплексу приготування універсальної теплоакumuлюючої рідини.

Підібрано і досліджено теплофізичні властивості теплоакumuлюючого матеріалу з фазовим переходом для «теплого ядра» ємкісного акумулятора, а саме обрано матеріал з фазовим переходом церезин.

За результатами роботи створено дослідний зразок мобільного теплового акумулятору МТА-0,5МВт та вибухо-пожежобезпечну теплоакumuлюючу рідину. Проведено комплекс досліджень для визначення теплофізичних параметрів теплоакumuлюючої рідини та матеріалу з фазовим переходом.

Результати роботи спрямовані на вирішення важливої проблеми постачання теплової енергії при порушенні системи теплозабезпечення внаслідок надзвичайних ситуацій і військових дій. У якості джерела заряджання дослідного зразка МТА-0,5МВт застосовуються будь-які доступні джерела енергії або місцеві види палив. Об'єктами постачання теплової енергії є – військові, цивільні та інфраструктурні будівлі.

Ключові слова: теплове акумулювання, мобільний тепловий акумулятор, теплоакumuлююча рідина, матеріал з фазовим переходом, теплофізичні властивості.

Корук А.В. Thermophysical foundations of discrete heating systems using capacitive type thermal energy storage – copyright of the manuscript.

The thesis for a Doctor of Science Degree, specialty 05.14.06 – «Technical Thermophysics and Industrial Heat Power Engineering», Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv.

The thesis is devoted to solving the current issues of the development of the thermophysical principles of the theory of mobile thermal storage processes and their testing in real operating conditions, using mobile thermal energy storage, namely, a set of works was carried out to create a mobile thermal energy storage M-TES 0.5MW.

The thesis analyzes the current state of thermal energy transportation using mobile thermal energy storages, provides thermophysical parameters of storage fluids and technical characteristics of M-TES with the subsequent use of low-potential energy sources.

The purpose of the thesis is to develop the thermophysical principles of the theory of mobile thermal storage processes and their testing in real operating conditions of the mobile thermal energy storage M-TES 0.5MW.

As a result of the analytical modeling of heat and mass transfer and hydrodynamic processes in order to create a design of a mobile thermal accumulator, namely:

- to study the processes of heat exchange and hydrodynamics and define limiting modes in a capacitive type of thermal energy, a theory of problems of radiation-convective

heat exchange during film boiling of a liquid on a vertical heated plate has been developed. Stationary and unsteady heat exchange problems have been investigated;

- to study the accumulation process, an analytical research of the heat exchange process inside the “thermal core” filled with a material with a phase transition was conducted. The equation of the heating rate of the material with a phase transition inside the “thermal core” has been obtained taking into account the radial heat transfer;

- to study the process of hydrodynamics of the coolant flow, a non-stationary model of oscillating fluid flow in flat and cylindrical channels in porous media has been developed;

- to create a heat-accumulating fluid, a combined model has been used that combines molecular dynamics and dissipative particle dynamics.

A new explosion- and fire-resistant heat-storing liquid based on water-soluble polymers of natural origin has been created, its thermophysical properties have been investigated, and its service life has been established. A flow chart of a mobile technological complex for the preparation of a universal heat-storing liquid has also been proposed.

The thermophysical properties of a heat-storing material with a phase transition for the “thermal core” of a capacitive battery have been selected and investigated, namely, the phase change material ceresin has been selected.

Based on the results of the thesis, a prototype of a mobile thermal energy storage M-TES 0.5MW and an explosion- and fire-resistant heat-storing liquid have been created. A set of studies has been conducted to determine the thermophysical parameters of the heat-storing liquid and the phase change material.

The results of the thesis are aimed at solving the important problem of heat energy supply in case of disruption of the heat supply system due to emergency situations and military operations. Any available energy sources or local fuels are used as a charging source for the prototype M-TES 0.5MW. The objects of heat energy supply are military, civil and infrastructure buildings.

Keywords: thermal storage, mobile thermal energy storage, heat-accumulating liquid, phase change material, thermophysical properties.

Підписано до друку 09.01.2026 р. Формат 60х901 /16.
Ум. друк. арк. 1,9.
Наклад 100 прим. Замовлення № 0901/01

Надруковано ФОП Гузік О.М.
Реєстраційний номер №2705814113
м. Київ, вул. Б. Гаврилишина, 16
Тел.: 338-16-61.